



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**POROVNÁNÍ SOFTWARE PRO NAVRHOVÁNÍ
A KONTROLU TLAKOVÝCH NÁDOB**

SOFTWARE COMPARISON FOR DESIGN AND CONTROL OF PRESSURE VESSELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lucie Staňková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Lošák, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Studentka: **Lucie Staňková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Lošák, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Porovnání softwarů pro navrhování a kontrolu tlakových nádob

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při návrhu tlakových nádob, výměníků tepla a dalších částí spadajících pod PED 2014/68/EU je možno využít řady komerčně dostupných nástrojů. Cílem bakalářské práce je návrh dané části zařízení za pomoci tří softwarů – PV Elite, Sant'Ambrogio a VVD. Bakalářská práce porovná výsledky výpočtů, zdůvodní případné odchylky a porovná výpočty s vlastní výpočtem dle normy ČSN EN 13445–3.

Jelikož za chyby výpočtu, a to i pokud je výpočet proveden certifikovaným komerčním softwarem odpovídá výpočtář, je značnou výhodou podrobná znalost výpočtových postupů.

Cíle bakalářské práce:

- Literární rešerše z oblasti návrhů zařízení dle platné legislativy.
- Popis dostupných výpočtových softwarů, jejich možností a uživatelského prostředí. Diskuze nad jejich silnými a slabými stránkami.
- Provedení výpočtů dané části zařízení dle analytických vztahů ručně i za pomoci zmíněných softwarů.
- Vyhodnocení výsledků a vysvětlení případných nesrovnalostí napříč softwary.

Seznam doporučené literatury:

CHATTOPADHYAY, Somnath. Pressure vessels: design and practice. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, c2005. Mechanical engineering series (Boca Raton, Fla.), 25. ISBN 978-0-8493-1369-1.

Český normalizační institut, ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA, Netopené tlakové nádoby, ČSN EN 13445. 2015.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

.....

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

.....

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavní náplní předkládané práce je porovnání softwarů pro navrhování a kontrolu tlakových nádob. Toto srovnání je provedeno prostřednictvím návrhu zadané tlakové nádoby, konkrétně výměníku tepla. Výměník tepla je navržen v softwarech Sant'Ambrogio, Visual Vessel Design a PV Elite. Jsou hodnoceny silné a slabé stránky použitých softwarů. Práce se zabývá mnoha aspekty návrhu, tedy grafickým zpracováním, uživatelským prostředím, přehledností i vypočítanými výsledky. Pro plášť a torosférické dno jsou podrobně zkoumány výsledky všech softwarů a odůvodněny odchylky od vlastního výpočtu dle normy ČSN EN 13445. Součástí práce je také rešerše návrhu tlakových nádob.

ABSTRACT

The main goal of this thesis is to compare different software for pressure vessels design and control. This comparison is done by designing a given pressure vessel, specifically a heat exchanger. The heat exchanger is designed in software Sant'Ambrogio, Visual Vessel Design and PV Elite. Advantages and disadvantages of used software are discussed. Thesis evaluates various aspects of design, particularly graphic interfaces, user-friendliness, clarity and calculated results. The results for the cylindrical shell and the torispherical end of each software are analysed and compared to own calculations based on ČSN EN 13445 design code. Differences among results are explained. Thesis also contains the literature search report of pressure vessels design.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tlaková nádoba, výměník tepla, ČSN EN 13445, Sant'Ambrogio, Visual Vessel Design, PV Elite, porovnání softwarů

KEY WORDS

Pressure vessel, heat exchanger, ČSN EN 13445, Sant'Ambrogio, Visual Vessel Design, PV Elite, software comparison

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STAŇKOVÁ, L. *Porovnání softwarů pro navrhování a kontrolu tlakových nádob*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Lošák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato bakalářská práce je mým původním dílem a vypracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Lošáka, Ph.D. Vycházela jsem při tom ze svých znalostí, odborných konzultací a literárních zdrojů uvedených v této práci.

V Brně dne 24. 5. 2019

.....

Lucie Staňková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Pavlu Lošákovi, Ph.D. za trpělivost, ochotu a cenné rady při zpracovávání této bakalářské práce. Děkuji také své rodině a přátelům za podporu během celého studia.

OBSAH

Úvod	15
1 Tlakové nádoby	16
1.1 Použití tlakových nádob	16
1.2 Výměníky tepla	16
1.2.1 Rozdělení výměníků tepla	16
1.2.2 Části výměníku tepla	17
2 Návrh tlakových nádob.....	18
2.1 Materiály pro tlakové nádoby.....	18
2.2 Způsoby návrhu tlakových nádob	18
2.2.1 Návrh na základě vzorců (DBF = Design by formula).....	18
2.2.2 Návrh na základě analýzy (DBA = Design by analysis)	19
2.2.3 Návrh na základě experimentu (DBE = Design by experiment).....	19
2.3 Návrhový proces	19
2.3.1 Postup návrhu tlakových nádob.....	19
2.3.2 Postup návrhu výměníku tepla.....	20
2.4 Normy.....	21
2.4.1 Směrnice PED	21
2.4.2 Norma ČSN EN 13445	21
2.4.3 ASME normy.....	22
3 Informace o konkrétním zadání	24
3.1 Zadaný výměník tepla	24
3.2 Zadané parametry	25
4 Subjektivní porovnání používaných softwarů	26
4.1 Grafické zpracování	26
4.2 Uživatelské prostředí	28
4.2.1 Práce v softwaru Sant'Ambrogio.....	28
4.2.2 Práce v softwaru VVD.....	29
4.2.3 Práce v softwaru PV Elite	30
4.3 Možnosti materiálových databází	31
4.4 Upozornění a varování softwaru	32
4.5 Výstupní protokol (report)	34
5 Nesrovnalosti v softwarech.....	36

5.1	Plášť v softwaru Sant' Ambrogio.....	36
5.2	Torosférické dno v softwaru Sant' Ambrogio.....	37
5.3	Nesoulad v označení příruby v Sant' Ambrogio	38
6	Porovnání používaných softwarů na základě výsledků.....	39
6.1	Plášť	40
6.1.1	Vlastní výpočet	40
6.1.2	Tloušťka pláště podle softwarů	43
6.1.3	Tlaky pro plášť podle softwarů.....	44
6.1.4	Shrnutí výpočtu pláště	45
6.1.5	Závěr pro plášť	47
6.2	Torosférické dno	47
6.2.1	Vlastní výpočet	47
6.2.2	Tloušťka torosférického dna podle softwarů	48
6.2.3	Tlaky pro torosférické dno podle softwarů	50
6.2.4	Shrnutí výpočtu torosférického dna	51
6.2.5	Závěr pro torosférické dno	53
	Závěr.....	54
	Seznam použitých zdrojů	55
	Seznam použitých zkratk.....	57
	Seznam obrázků	58
	Seznam tabulek	59
	Seznam příloh.....	60

Úvod

Proč je důležité se zabývat porovnáním softwarů pro navrhování a kontrolu tlakových nádob? Bohužel může dojít k tomu, že certifikovaný komerční software obsahuje chybu, která způsobí špatné vyhodnocení situace. Nicméně výpočtář je zodpovědný za svůj návrh zařízení a ručí za správnost výsledků, proto je důležité, aby byl schopen případné chyby softwarů odhalit.

Cílem této bakalářské práce je porovnání softwarů Sant'Ambrogio (SA), Visual Vessel Design (VVD) a PV Elite (PVE). To může být využito při výběru vhodného softwaru. Srovnání je provedeno prostřednictvím návrhu zadané tlakové nádoby, konkrétně výměníku tepla. Řešený výměník tepla je navržen ve všech třech uvedených softwarech. Během návrhu zařízení se autorka setkala s různými aspekty softwarů a na základě toho zhodnotila softwary z různých hledisek.

V rámci subjektivního porovnání softwarů jsou uvedeny osobní názory autorky na grafické zpracování, uživatelské prostředí, upozornění softwarů i přehlednost materiálových databází a výstupních protokolů. Dále jsou uvedeny nesrovnalosti softwarů, které se objevily při návrhu analyzovaného výměníku tepla. Následně se práce zabývá porovnáním na základě vypočítaných výsledků.

K tomuto porovnání byl proveden vlastní výpočet pláště a torosférického dna podle normy ČSN EN 13445-3 [1] a dalších souvisejících norem. Postup výpočtu je podrobně vysvětlen, takže tato práce může sloužit i jako návod, jak postupovat při výpočtu podle zmíněné normy. Spočítané hodnoty softwarů Sant'Ambrogio, Visual Vessel Design a PV Elite se lišily, přestože všechny softwary počítaly podle stejné normy (včetně roku vydání), tudíž by se měly výsledky shodovat. Byly hledány příčiny rozdílů a odchylky byly vysvětleny. Práce tedy upozorňuje na chyby, které se objevují ve výpočetních softwarech.

1 TLAKOVÉ NÁDOBY

Následující kapitola poskytuje stručné informace o tlakových nádobách. Mezi ně patří také výměníky tepla, kterým je věnována bližší pozornost, protože je v praktické části proveden návrh právě výměníku tepla.

1.1 Použití tlakových nádob

Tlaková nádoba je charakterizovaná rozdílem vnitřního a vnějšího tlaku, obvykle bývá vyšší vnitřní tlak. Americká asociace strojních inženýrů (ASME) specifikuje rozsah vnitřních tlaků pro tlakové nádoby od 0,1 MPa do 30 MPa. Jedná se o nádoby, tanky a potrubí, kde dochází ke skladování nebo toku tekutin. Tlaková nádoba musí být navržena tak, aby zamezila úniku tekutiny. Dále musí odolávat provozní teplotě a tlaku. Při poškození tlakové nádoby může dojít k velkým škodám, proto je nutné potenciálním poškozením předcházet a zaměřit se na návrh zařízení. [2]

Použití tlakových nádob sahá do různých odvětví průmyslu, od energetického, přes petrochemický, až po chemický. Tlakové nádoby slouží pro účely výrobní nebo skladovací, mohou v nich probíhat např. chemické reakce, separace nebo přenos tepla. [2]

Existuje celá řada velikostí a tvarů tlakových nádob. Velikost může dosahovat obrovských rozměrů, jako mají například válcové nádoby pro uskladňování plynu. Na druhou stranu se jako tlakové nádoby klasifikují i malé hydraulické jednotky do letadel. Většina tlakových nádob je kulová nebo válcová s klenutým dnem. Obecně jsou upřednostňovány válcové, protože se snadněji vyrábí a také umožňují lepší využití dostupného prostoru. To platí pro kotle, výměníky tepla i chemické reaktory. Naopak kulové nádoby se používají v případech, kdy je výhodná nižší tloušťka, např. pro velké plynové nebo kapalinové nádoby a plynem chlazené jaderné reaktory. [2]

1.2 Výměníky tepla

Jak již plyne z názvu, výměníky tepla se používají k výměně tepla. Jako zařízení pro výměnu tepla mohou sloužit vařáky, kondenzátory, spalovací komory, výměníky z teplosměnných trubek, výměníky odpadního tepla, chladicí věže, sušárny, odparky a další. [3]

1.2.1 Rozdělení výměníků tepla

Konstrukcí zařízení se dá zajistit široká variabilita vlastností. U **směšovacích** výměníků dochází k výměně tepla bez oddělovací plochy, přičemž dochází i k přenosu hmoty. Při použití **regeneračních** výměníků se přenosu tepla zúčastňuje jedna plocha. Pro **rekuperační** výměníky platí, že se přenos tepla uskutečňuje přes dvě pracovní plochy, protože jsou pracovní látky rozděleny nepohyblivou stěnou. Podle **smyslu proudění** teplotonosných médií rozlišujeme výměníky souproudé, protiproudé, s křížovým prouděním a s kombinovaným prouděním. [3]

Výměníky tepla můžeme podle konstrukce dělit na trubkové, deskové a speciální. **Trubkové** výměníky tepla mohou být provedeny s přímými, vinutými nebo Fieldovými trubkami. Přímé trubky jsou realizovány jako typ trubka v trubce či svazkem trubek

v plášti. **Deskové** výměníky tepla obsahují rovinné, spirálové nebo lamelové desky, případně jsou tvořeny deskami a výplněmi. [3]

1.2.2 Části výměníku tepla

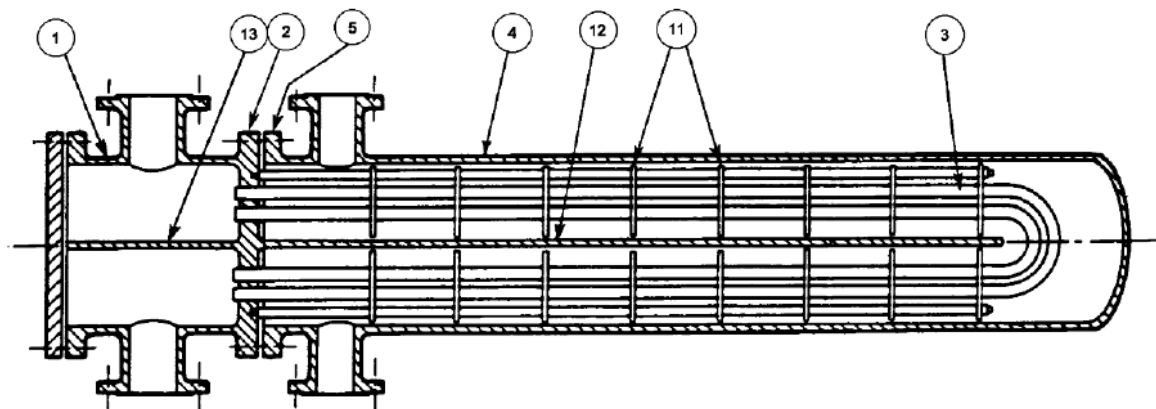
Základní část je **svazek trubek**, jenž představuje plochu pro přenos tepla mezi teplotonosnými médii. Vnější povrch je ovlivněn pracovní látkou z mezitrubkového prostoru a vnitřní povrch pracovní látkou z trubkového prostoru. Trubky mohou být provedeny hladké nebo žebrované. Ve většině případů bývají trubky připevněny na obou koncích do trubkovnice, ale pro typ s U-trubkami pouze do jedné trubkovnice. [3]

Trubkovnice je kruhová deska vybavená otvory pro trubky a vodicí tyče. Trubky mohou být do trubkovnice buď zaválcovány, přivařeny, případně obojí. Trubkovnici lze k plášti výměníku přišroubovat či přivařit. [3]

Jako obal svazku trubek slouží **plášť**. Pláštěm prochází pracovní látka mezitrubkového prostoru, podle toho se v anglické literatuře označuje mezitrubkový prostor jako plášťová strana (shell side). [3]

Na plášť navazují **hrdla**, která slouží pro vstup a výstup teplotonosných médií. Hrdla, která jsou připojena k plášti, slouží pro pracovní látku mezitrubkového prostoru. Hrdla, jež jsou napojena na komory, jsou určena pro pracovní látku trubkového prostoru. [3]

V praktické části je analyzován výměník tepla s U-trubkami, proto je uveden obrázek 1, který zobrazuje právě tento typ, včetně popisků.



Obrázek 1 Výměník tepla s U-trubkami [1]

Legenda

1	Nepohyblivá komora	5	Příruba pláště
2	Pevná trubkovnice	11	Přepážky nebo podpěrné plechy
3	Trubky	12	Podélná přepážka
4	Plášť	13	Přepážka chodů

Konstrukce **přepážek** je variabilní a dá se tím ovlivnit proud média. Dále přepážky zajišťují ochranu před vibracemi a ohýbáním. [3]

Pláště a komory bývají napojeny pomocí přírub. Vnější část komory trubkového prostoru je prostřednictvím příruby spojena s **víkem**, jehož odšroubování umožňuje snadný přístup ke trubkovnici a k trubkám, což je užitečné při kontrole či údržbě. [3]

2 NÁVRH TLAKOVÝCH NÁDOB

Tato kapitola popisuje materiály a metody pro návrh tlakových nádob, zabývá se návrhovým procesem a normami. Při návrhu je klíčové, aby byl k reálnému problému přiřazen co nejpřesnější matematický model jednotlivých komponent a odpovídajících materiálových vlastností. K rozvoji návrhových metod přispívá numerické řešení problémů a aplikace znalostí z experimentů. Také podrobnější znalost rozložení napětí v komponentě může vést k lepšímu využití limitů mechanických vlastností materiálů. [2]

2.1 Materiály pro tlakové nádoby

Při použití kvalitnějšího materiálu postačuje nižší tloušťka tlakové nádoby, takže při výběru materiálu je rozhodující splnění všech podmínek provozu při co nejvyšší ekonomické výhodnosti. Pro konstrukci tlakových nádob se používají oceli, neželezné materiály jako hliník a měď, speciální kovy jako titan a zirkonium, nekovové materiály jako plasty, kompozity a beton. Pro konstrukci zařízení jsou nejdůležitější mechanické vlastnosti materiálu, mezi něž patří mez kluzu, mez pevnosti, houževnatost, lomová houževnatost, odolnost vůči korozi, případně odolnost vůči dalším rozumně předvídatelným mezním stavům. Starší postupy návrhu zařízení byly založené na analýze statického zatěžování. Později se přišlo na to, že často dochází k selhání, pokud bývá zařízení zatěžováno cyklicky, tudíž je potřeba se zabírat také únavou materiálu či creepem. [2]

2.2 Způsoby návrhu tlakových nádob

Existují tři základní způsoby, kterými lze navrhovat tlakové nádoby. Jedná se o metody návrhu na základě vzorců, analýzy a experimentu. Tyto způsoby mohou být použity samostatně, popř. se dají kombinovat. [1] Podrobnější popis metod je v následujících podkapitolách. Je důležité upozornit, že se metody mohou lišit v závislosti na tom, podle které normy je posouzení provedeno. V popisu návrhových metod jsou nejdříve vysvětleny obecně platné principy jednotlivých metod. Poté je každá metoda blíže specifikována podle normy ČSN EN 13445-3 [1], protože je podle ní prováděn výpočet v praktické části.

2.2.1 Návrh na základě vzorců (DBF = Design by formula)

Tento způsob se používá pro návrh zařízení, které obsahuje běžné komponenty, např. plášť, torosférické dno, příruby, hrdla a další. Výhodou metody je relativní jednoduchost. Vzorce jsou založené na fyzikálních principech, zkušenostech a experimentech, zahrnují požadovanou míru bezpečnosti, která je charakteristická pro použitý předpis. [2]

V normě **ČSN EN 13445-3** [1] se metoda DBF liší podle složitosti geometrie. Pro jednoduché geometrické tvary (např. válce a koule) lze přímo určit požadovanou minimální tloušťku na základě vzorců, které zahrnují tlak a geometrické rozměry. Pro složitější geometrické tvary se předpokládá určitá analyzovaná tloušťka, pro kterou se pomocí vzorců určí napětí a/nebo poměry vytížení. Výsledná napětí nebo poměry vytížení se porovnávají s dovolenými hodnotami. Jedná se o iterační proces. Pro přírubové spoje a trubkovnice výměníků tepla existuje vícenásobná sada pravidel. [1]

2.2.2 Návrh na základě analýzy (DBA = Design by analysis)

Pro méně obvyklé tvary a stavy zatížení, které nedefinuje daná norma metodou DBF, se používá návrh na základě analýzy. Největší výhodou této metody je aplikovatelnost na jakoukoliv komponentu. Ovšem pokud je možné danou komponentu navrhnout pomocí vzorců, tak je efektivnější využít postup DBF. [2]

Návrh na základě analýzy podle normy **ČSN EN 13445-3** [1] lze provést buď přímým způsobem, nebo metodou založenou na kategorizaci napětí.

Při použití **přímého způsobu** jsou pro různé mezní stavy specifikovány určité postupy, jak provádět analýzu, využívá se metody konečných prvků (MKP). [1] K jednotlivým mezním stavům přísluší tzv. kontrola konstrukce. Jedná se o mezní stavy přizpůsobení, ztráty stability, únavy, statické rovnováhy u vysokých konstrukcí, únosnosti při tečení, deformace při tečení a únavy v oblasti tečení, případně další mezní stavy, které lze při provozu zařízení očekávat. [4]

Metoda založená na kategorizaci napětí nedosahuje takové přesnosti, ale oproti přímému způsobu je jednodušší. Využívá faktu, že selhání tlakových nádob je obecně závislé na hodnotě působícího napětí, proto se určuje distribuce napětí. [2] Pro tlakovou nádobu jsou vypočtena napětí – většinou pomocí MKP. Napětí jsou rozdělena do několika kategorií. Pro každou kategorii je stanovena dovolená hodnota, se kterou se srovnávají vypočtená napětí. [1]

2.2.3 Návrh na základě experimentu (DBE = Design by experiment)

Tato metoda návrhu se používá pro nádoby nebo jejich části zatížené tlakem. Většinou obsahuje zkoušku na roztržení, která může být doplněna kontrolou deformace a zkouškou na únavu. Návrh na základě experimentu lze použít izolovaně nebo pro potvrzení závěrů předchozích metod. Nicméně obecně se preferují návrhy na základě vzorců či analýzy. [4]

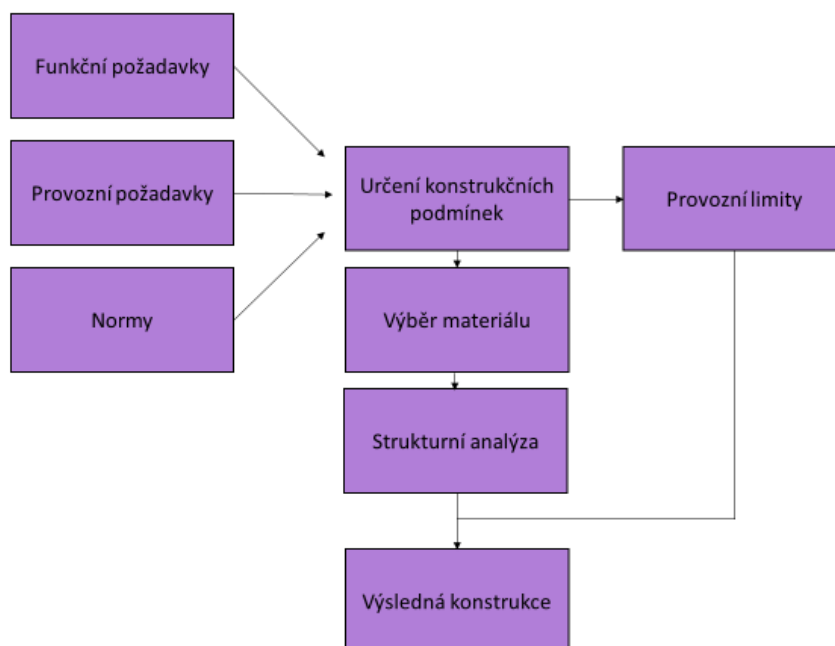
Podle normy **ČSN EN 13445-3** [1] lze samostatně metoda DBE použít, pokud platí, že součin nejvyššího dovoleného tlaku (PS) a objemu (V) je menší než 6000 barL. [1]

2.3 Návrhový proces

Tato podkapitola poskytuje nástin postupu pro návrh jak tlakových nádob obecně, tak výměníků tepla.

2.3.1 Postup návrhu tlakových nádob

Návrh tlakové nádoby je komplexní proces, který je možné rozdělit do určitých kroků. Pro lepší přehlednost je uveden obrázek 2, jenž objasňuje postup návrhu. Nejdříve jsou stanoveny konstrukční podmínky, což zahrnuje funkční požadavky, provozní požadavky a normy. Pod funkční požadavky spadají geometrické parametry jako velikost, tvar a poloha. Dalším krokem je výběr vhodných materiálů. Poté je podle konkrétní normy určeno dovolené nebo jmenovité napětí, které je použito k určení tloušťky hlavní tlakové nádoby. Dále jsou podle normy navrženy komponenty jako hrdla, příruby atd. Výsledný návrh je analyzován na mezní stavy poškození. Jedná se o iterační proces, který se opakuje až do dosažení ekonomicky výhodného, a přitom spolehlivého produktu. [2]



Obrázek 2 Schéma návrhového procesu [2]

Výsledná konstrukce bývá výsledkem optimalizace ceny a bezpečnosti. Při úvahách o bezpečnosti je potřeba počítat s tím, že nemůže být přesně určena, a to ze dvou důvodů. Zaprvé, skutečné namáhání v provozu může přesahovat předpokládané podmínky zatěžování, může také dojít k nepředvídatelným událostem. Zadruhé, znalosti ohledně mezních stavů materiálů a stavů napjatosti jsou omezené a dostupné metody tedy plně nepopisují zkoumanou realitu, ale zavádějí řadu zjednodušení. Přestože není zcela porozuměno mechanismu selhání, je možno provádět preventivní měření založená na semiempirických metodách, a tak zpřesnit návrh. [2]

Tyto úvahy vedly k rozřazení tlakových nádob, od jaderných reaktorů až po podzemní tanky na vodu, podle toho, jaká je pravděpodobnost selhání a jaké následky by případné selhání způsobilo. Návrhový bezpečnostní součinitel podle použité normy by měl obsáhnout neznámé aspekty spojené s návrhem a konstrukcí zařízení. V návrhových vzorcích a při napěťové analýze se používají obecné aproximace a předpoklady. Typickým příkladem je předpoklad homogenního a izotropního materiálu, který se samozřejmě v realitě nevyskytuje. V historii lze sledovat trend snižování návrhového bezpečnostního součinitele s přibývajícím znalostmi o tlakových nádobách a zvyšující se kvalitou materiálů. Děje se tak za účelem snižování výrobních nákladů. [2]

2.3.2 Postup návrhu výměníku tepla

Nejdříve je nutné vybrat nejvhodnější typ výměníku tepla pro danou aplikaci. Nejčastěji je upřednostňován výměník se svazkem trubek v plášti. Existují pro něj velmi přesné výpočtové vztahy. Mezi další výhody patří poměrně snadná konstrukce plochy výměny tepla, přičemž velikost této plochy může být v relativně značném rozsahu. Tento typ výměníků tepla dobře snáší obvyklá namáhání za provozu. Obvykle mohou být snadno očištěny. Části, které podlehnou závadě (nejčastěji těsnění a trubky) se dají lehce vyměnit. Použitelnost těchto výměníků má široký rozsah, může být při extrémně

nízkých i vysokých tlacích a teplotách, za určitých podmínek i při varu a kondenzaci, dokonce i pro případy pracovních látek korozivních či se sklonem k zanášení. [3]

Samotný výpočet zařízení na výměnu tepla se také skládá z několika kroků: výpočet termofyzikálních vlastností pracovních látek, výpočty hlavních rozměrů zařízení (energetická bilance, tepelně – hydraulický výpočet), výpočty zaměřené na konstrukci (pevnostní výpočty jednotlivých zařízení včetně výběru materiálu a zohlednění koroze) a optimalizační výpočty (optimalizace na základě ekonomiky procesu při uvážení investičních a provozních nákladů). [3]

2.4 Normy

Normy mohou udávat hranice bezpečného návrhu, a proto je podle nich velmi často počítáno. Výpočet může být proveden přímo ručně nebo pomocí softwaru. Tato podkapitola popisuje evropskou směrnici PED, evropskou normu ČSN EN 13445 a americkou normu ASME BPVC.

2.4.1 Směrnice PED

Jedná se o směrnici pro návrh, výrobu a použití tlakových zařízení. Směrnice PED (Pressure Equipment Directive) č. 97/23/ES z roku 1997 se stala v Evropské unii závaznou od května 2002. [5] V České republice bylo vydáno nařízení vlády č. 26/2003 Sb., čímž se stalo dodržování směrnice PED č. 97/23/ES závazné i na území ČR. [1]

Roku 2014 proběhla aktualizace směrnice a byla vydána směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/68/EU. Směrnice 2014/68/EU (PED) je závazná a zajišťuje soulad právních předpisů členských států ohledně tlakových zařízení. V ČR bylo vydáno nařízení vlády č. 219/2016 Sb, které je v kombinaci s ustanoveními zákona č. 90/2016 Sb. plnou transpozicí uvedené směrnice [6]

Pro lepší orientaci ve směrnici je možné navštívit webové stránky Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Ten na svých webových stránkách poskytuje dokument Pravidla pro aplikaci směrnice 2014/68/EU (PED) – tlaková zařízení, který vysvětluje, jak některé nejasné části směrnice implementovat do praxe. [7]

Je důležité zdůraznit, že dodržování směrnice PED 2014/68/EU je závazné, zatímco dodržování normy ČSN EN 13445 je dobrovolné. Právní závaznost tedy neplyne automaticky vydáním normy ČSN EN 13445, ale může vzniknout z jiného právního aktu, např. pokyn nadřízeného, smlouva, rozhodnutí správního orgánu nebo právní předpis. [8] Norma ČSN EN 13445 je harmonizována v souladu se Směrnicí pro tlaková zařízení (2014/68/EU). Pokud jsou dodrženy požadavky normy ČSN EN 13445, tak je tím současně zajištěno i dodržení požadavků PED. [1]

2.4.2 Norma ČSN EN 13445

Norma ČSN EN 13445 se týká „Netopených tlakových nádob“. Termínem „netopené“ jsou z normy vyčleněné nádoby, na něž působí přímo vytvářené teplo nebo plamen dopadající z topného procesu. Norma zahrnuje nádoby otápěné elektricky nebo proudem ohřevné látky. [9]

České verze evropské normy, s označením ČSN EN, bývají nejdříve převzaty schválením k přímému používání, později přejaty překladem z originální normy. Evropská norma EN 13445 poprvé vyšla roku 2002. Od té doby byla několikrát aktualizována. Každá část normy může být vydána samostatně, to znamená, že pro každou část normy může být aktuální jiný rok vydání. Následující odstavec se zabývá historií normy ČSN EN 13445-3, protože se jedná o část pro konstrukci a výpočet, tudíž byla tato část normy nejvíce používána v praktické části.

V listopadu 2002 byla vydána norma ČSN EN 13445-3, která byla převzata z EN 13445-3:2002 schválením k přímému používání. Stejná evropská norma byla přejata překladem v říjnu roku 2003. [10] Evropská norma byla aktualizována roku 2009. V ČR byla v únoru 2010 převzata EN 13445-3:2009 schválením k přímému používání jako ČSN, v říjnu 2010 byla přejata překladem. [11] Dále byla roku 2014 vydána evropská norma EN 13445-3:2014 která byla v březnu 2015 převzata schválením k přímému používání a v dubnu 2018 byla přejata překladem. [1]

Norma ČSN EN 13445 je rozdělena na následující části [1]:

1. Část 1: Všeobecně
2. Část 2: Materiály
3. Část 3: Konstrukce a výpočet
4. Část 4: Výroba
5. Část 5: Kontrola a zkoušení
6. Část 6: Požadavky pro návrh a výrobu tlakových nádob a tlakových částí z litiny s kuličkovým grafitem
7. CR 13445-7 Netopené tlakové nádoby – Část 7: Návod na používání postupů posouzení shody
8. Část 8: Doplnující požadavky na nádoby z hliníku a slitin hliníku
9. CEN/TR 13445-9 Netopené tlakové nádoby – Část 9: Konformita řady EN 13445 k ISO 16528

Pro konstrukční návrh a výrobu tlakové nádoby je nutné použít všechny související části normy, protože jsou vzájemně provázány. Pouze ve výjimečných případech je možné pro doplnění použít jinou normu. [1]

2.4.3 ASME normy

Jedná se o americké normy pod záštitou ASME. Normy vznikly jako reakce na časté výbuchy kotlů na přelomu 19. a 20. století. Bylo nutné předcházet haváriím, a proto byly sestaveny normy. První norma pro konstrukci parních kotlů byla vydána organizací Commonwealth of Massachusetts v roce 1907. Roku 1914 byla vydána norma ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC). V této normě byla snaha o standardizaci návrhu, výroby a kontroly kotlů a tlakových nádob. První publikace Sekce VIII nesoucí název „Netopené tlakové nádoby“ byla vydána roku 1925, přičemž byl použit teoretický součinitel bezpečnosti 5. To nevyhovovalo potřebám petrochemického průmyslu, tudíž byla roku 1934 vydána norma specializovaná na tlakové nádoby v petrochemickém průmyslu. V roce 1952 byly tyto dvě oddělené normy sloučeny do normy ASME Netopené tlakové nádoby, Sekce VIII; roku 1968 byla

tato norma přejmenována na Sekce VIII Divize 1: „Tlakové nádoby“ a byla přidána Divize 2: „Alternativní pravidla pro tlakové nádoby“. [2]

Norma ASME BPVC je zaměřena na určení pravidel pro návrh, výrobu a kontrolu tlakových nádob. Je snaha o prověření nádob z hlediska všech potenciálních mezních stavů a určení odpovídajících rozsahů bezpečnosti. Musí být zajištěn řádný návrh a konstrukce, patřičná údržba a kontrola i vyhovující provoz. Splnění těchto požadavků je zaručeno dodržováním normy ASME BPVC. Je nevyhnutelné, aby všechny tlakové nádoby byly navrženy pro nejhorší možné podmínky působení tlaku a teploty během provozu, odchylky nejsou povoleny ani výjimečně. Aby byla zajištěna spolehlivost, je důležité provádět pravidelnou kontrolu. [2]

V současnosti je norma ASME BPVC je členěna na 13 částí, které se zabývají následujícími oblastmi [2,12]:

1. Sekce I: Elektrárenské kotle¹
2. Sekce II: Materiály
3. Sekce III: Obecné požadavky, pravidla pro nádoby jaderných elektráren
4. Sekce IV: Pravidla pro konstrukci kotlů pro vytápění²
5. Sekce V: Nedestruktivní zkoušky
6. Sekce VI: Doporučení pro údržbu a provoz vytápěcích kotlů
7. Sekce VII: Doporučení pro údržbu elektrárenských kotlů
8. Sekce VIII: Pravidla pro konstrukci tlakových nádob
9. Sekce IX: Svařování a pájení
10. Sekce X: Plastové tlakové nádoby zpevněné skleněným vláknem
11. Sekce XI: Pravidla pro provozní kontroly komponent jaderných elektráren
12. Sekce XII: Pravidla pro konstrukci a provoz dopravních tanků³
13. Sekce XIII: Pravidla pro přetlakovou ochranu⁴

V starší literatuře [2] chybí nedávno přidané sekce, proto byly doplněny podle oficiálních webových stránek ASME [12].

¹ Z anglického Power Boilers.

² Z anglického Heating Boilers.

³ Sekce byla přidána roku 2004.

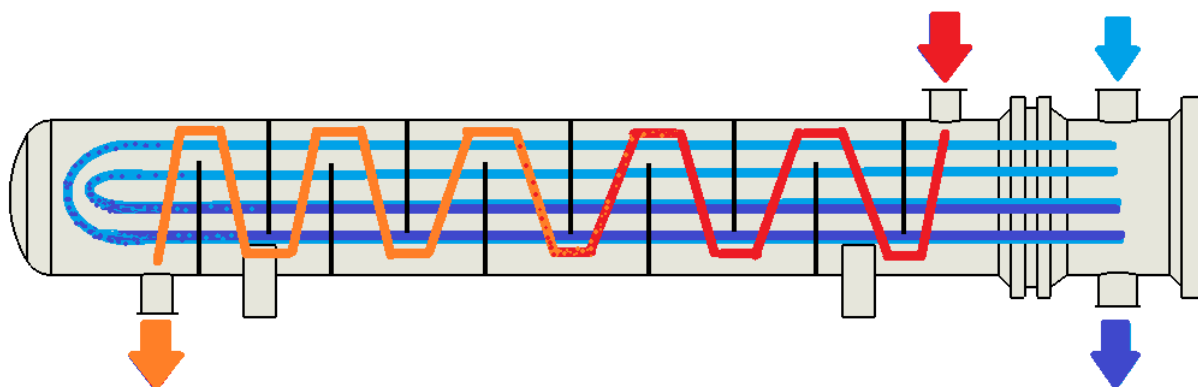
⁴ Sekce byla přidána roku 2016.

3 INFORMACE O KONKRÉTNÍM ZADÁNÍ

Jak už bylo zmíněno, cílem praktické části je porovnání softwarů, což se děje prostřednictvím návrhu výměníku tepla.

3.1 Zadaný výměník tepla

Jedná se o výměník tepla s U-trubkami. Princip fungování výměníku je patrný z obrázku 3. Do trubkového prostoru vstupuje studená voda o teplotě $29\text{ }^{\circ}\text{C}$, která se ohřívá až na výstupní teplotu $39\text{ }^{\circ}\text{C}$. Do mezitrubkového prostoru je přivedena teplá voda o teplotě $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, jejíž teplota klesá až na $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bližší informace jsou dále uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 3 Ilustrační obrázek zadaného výměníku tepla

3.2 Zadané parametry

V tabulce 1 jsou uvedeny parametry výměníku tepla určené zadáním.

Tabulka 1 Zadané parametry výměníku tepla.

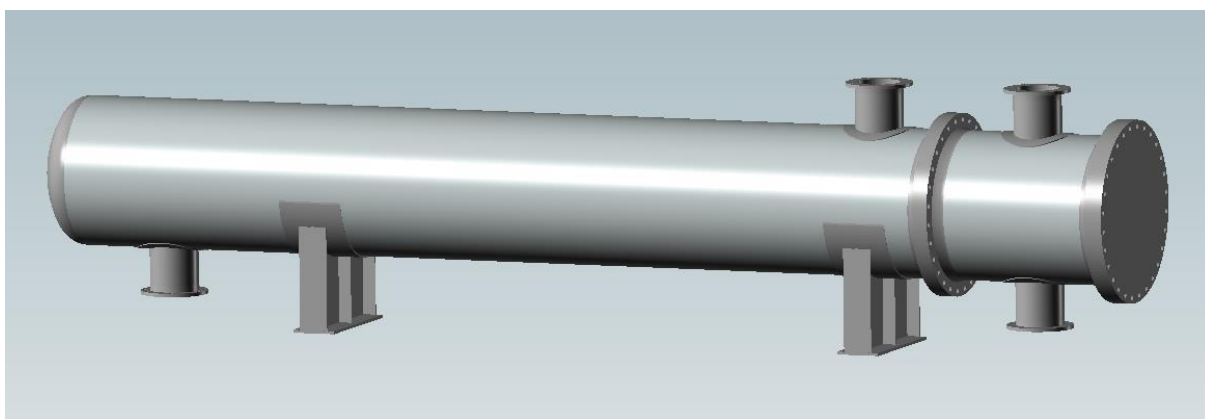
Výměník tepla				
Typ: AEU, horizontální			Velikost: 1000 x 6000 mm	
	trubkový prostor		mezitrubkový prostor	
Médium	studená voda		teplá voda	
Teplota vstupu a výstupu	29 °C	39 °C	110 °C	60 °C
Hustota	1000 kg/m ³	1000 kg/m ³	1000 kg/m ³	1000 kg/m ³
Konstrukční tlak	1,5 MPa			
Konstrukční teplota	120 °C		185 °C	
Korozní přídavek	4 mm			
Trubky	vnější průměr:	25 mm	tloušťka:	2,5 mm
	rozteč:	32 mm, 45°	délka:	6000 mm
Plášť	vnitřní průměr:	1000 mm	tloušťka:	12 mm
Materiály	Komponenty s daným materiálem			
P235GH	Plášť, komora, torosférické dno, trubkovnice, trubky, hrdla, podpurná sedla			
P355GH	Příruby			
C35E (QT)	Šrouby			

4 SUBJEKTIVNÍ POROVNÁNÍ POUŽÍVANÝCH SOFTWAREŮ

V této kapitole je provedeno srovnání softwarů Sant'Ambrogio, Visual Vessel Design a PV Elite. Na každém z nich lze nalézt výhody i nevýhody, proto jsou srovnána různá hlediska. Na začátku je nutné upozornit, že v této kapitole jsou uvedeny zcela subjektivní názory autorky, protože každý uživatel může některé aspekty softwarů vnímat jinak.

4.1 Grafické zpracování

Velmi dobré grafické zpracování nabízí software **Sant'Ambrogio** – zobrazuje se 3D model s možností natáčení i přibližování a oddalování, ovládání je intuitivní a obdobné jako v běžných softwarech určených ke 3D modelování. Zobrazení modelu vytváří realistický dojem díky stínování ploch, jak je patrné z obrázku 4.



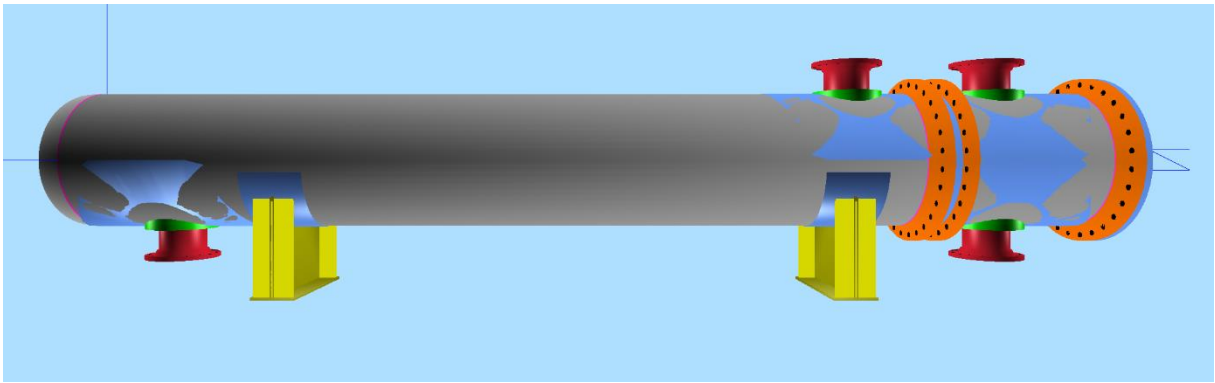
Obrázek 4 Zobrazení modelu výměníku tepla v Sant'Ambrogio

Na obrázku 5 je zobrazen přední pohled na model v softwaru Sant'Ambrogio. Tento obrázek je uveden z důvodu porovnatelnosti předního pohledu v softwaru VVD, viz obrázek 6.



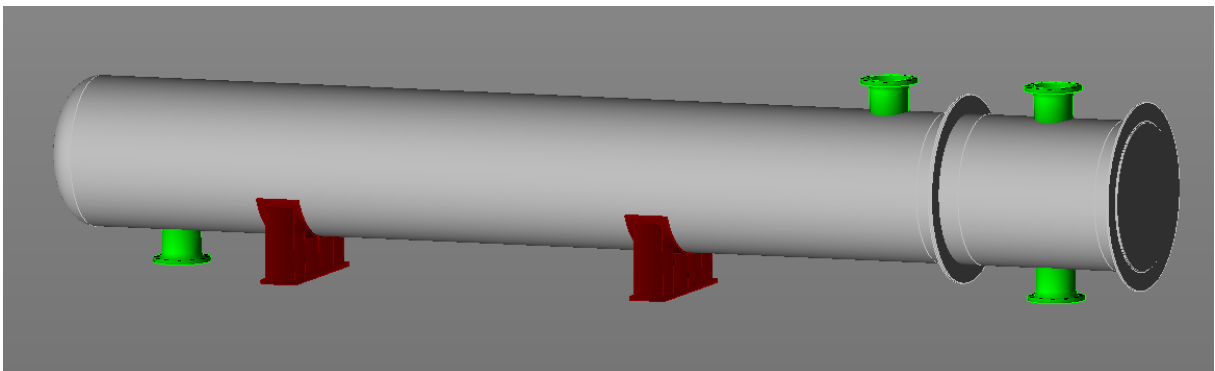
Obrázek 5 Přední pohled na model v Sant'Ambrogio

Ve **VVD** je výměník tepla zachycen ze zvláštní perspektivy. Model v předním pohledu působí tak, jako kdyby válcová část nebyla přímá, ale ve tvaru anuloidu, což je možné vidět na obrázku 6. Snaha o zobrazení perspektivy bohužel způsobuje také zkreslení délkových rozměrů. Po vložení výztužných límců k hrdlům se v modelu zobrazily modré oblasti. Ovládání modelu není přirozené. Také okna pro zadávání hodnot vypadají zastarale.



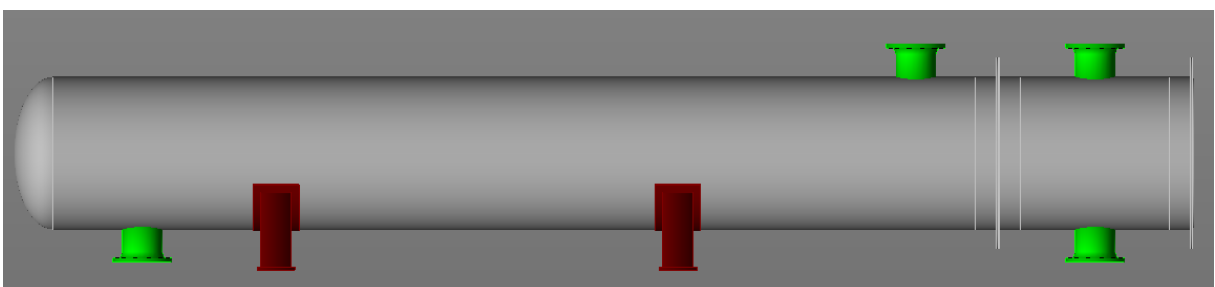
Obrázek 6 Přední pohled na model ve VVD

Software **PV Elite** má velmi moderní grafické zpracování. Ovládání modelu je velmi podobné jako v softwaru Sant'Ambrogio. Model se dá jednoduše otáčet, přibližovat a oddalovat. Software umožňuje jak ortografický, tak perspektivní pohled na model. Ortografické zobrazení modelu je na obrázku 7.



Obrázek 7 Zobrazení modelu výměníku tepla v PV Elite

Nastavení pohledů na model působí přirozeně, na obrázku 8 je přední pohled.



Obrázek 8 Přední pohled na model v PV Elite

4.2 Uživatelské prostředí

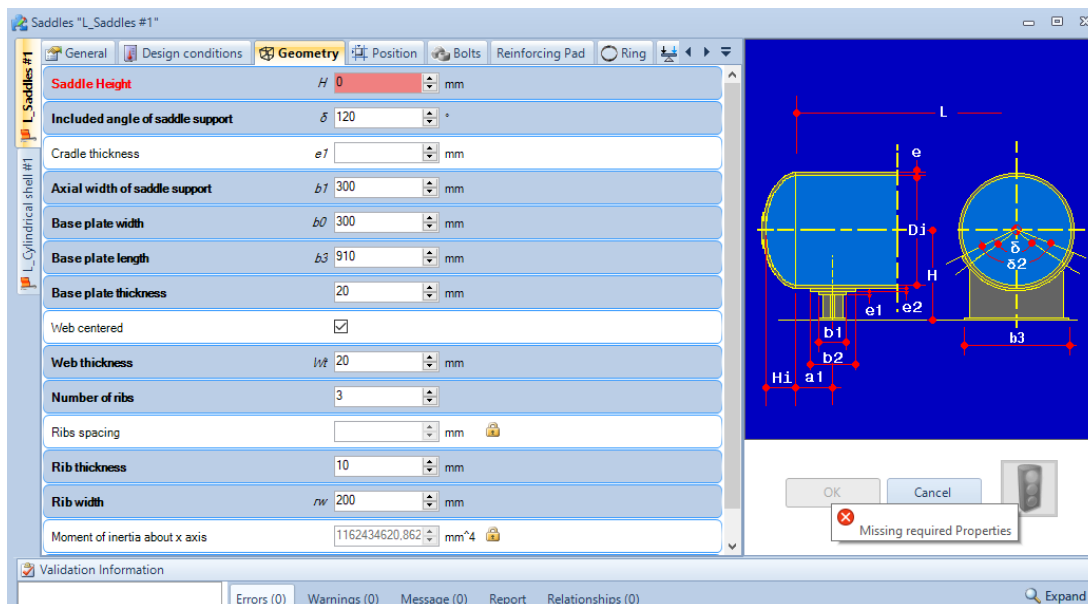
Tato podkapitola se zabývá interakcí softwaru a uživatele.

4.2.1 Práce v softwaru Sant'Ambrogio

Co se týče uživatelské přívětivosti, tak je v této práci Sant'Ambrogio velmi dobře hodnoceno. Při tvorbě modelu je možno velmi plynule navazovat, po kliknutí na komponentu se v horní liště zobrazí, které prvky by mohly následovat.

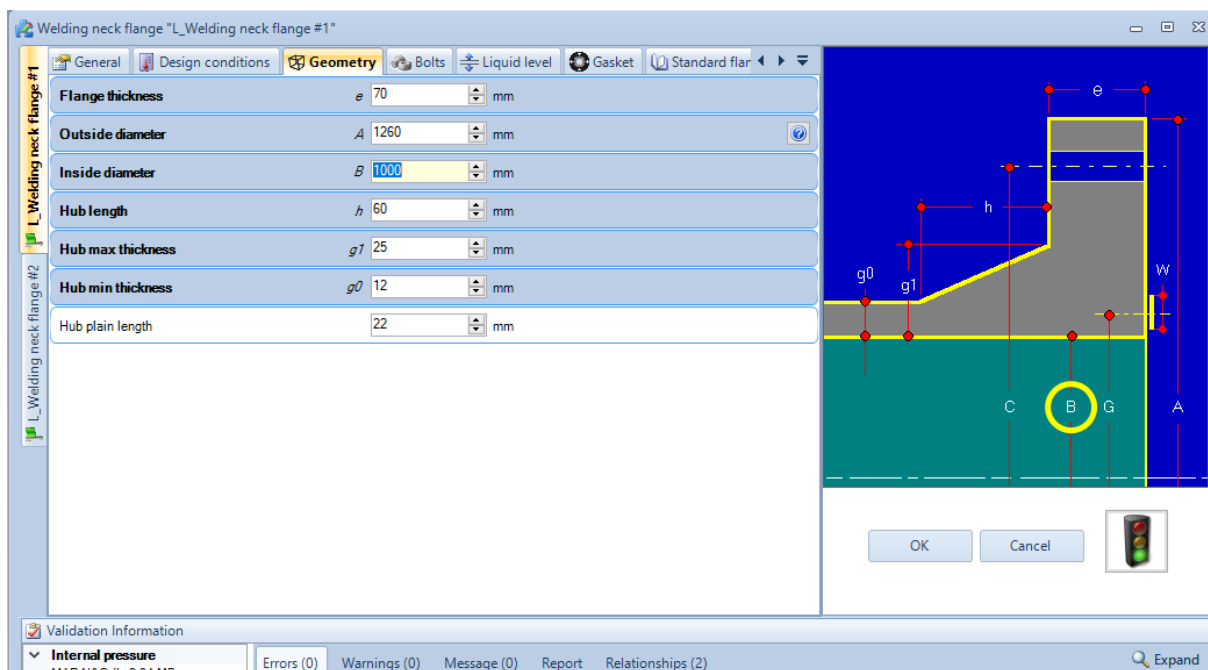
Při zadávání hodnot pro jednotlivé prvky software přímo vyhodnocuje, zda nedochází ke kolizi, software je tedy schopen okamžitě upozornit například na nízkou tloušťku. Upozorněním softwarů se dále zabývá samostatná podkapitola.

V případě, že chybí vyplnění některých důležitých parametrů, tak nelze stisknout tlačítko „OK“ pro potvrzení údajů komponenty. Software ukáže červeně, která hodnota je potřeba doplnit. Toto ukazuje obrázek 9, kde nebyla zadána výška sedla, tudíž musí být doplněna do červeného pole.



Obrázek 9 Reakce na chybějící údaj v softwaru Sant'Ambrogio

Jako pozitivní je považováno propojení zadávacích polí s náčrtem. V zadávacím okně se zobrazuje náčrt komponenty, který je zakótovaný obecným označením. Po kliknutí na kótu v náčrtu je uživatel přesměrován do příslušného zadávacího pole, což jde i naopak, tedy po kliknutí na zadávanou číselnou hodnotu se zobrazí kroužek kolem obecné kóty ve výkrese, viz obrázek 10.



Obrázek 10 Propojení zadávacích polí a kót na náčrtu v Sant'Ambrogio

4.2.2 Práce v softwaru VVD

Software VVD autorka nehodnotí jako uživatelsky přívětivý, protože působí zastarale a nereaguje dostatečně pružně na uživatelské zadání. Tento software uživatele neupozorňuje, když je něco neproveditelné. Toto bude vysvětleno na konkrétním případě: Do softwaru byla nejdříve zadána příruba podle DIN, ale později bylo rozhodnuto, že příruba nebude nakupovaná, ale vyrobená na míru, tudíž bylo možné některé rozměry změnit. Uživatelka přepsala hodnoty rozměrů, což bylo bez problému umožněno. Avšak při dalším otevření parametrů dané komponenty se objevily původní rozměry. Problém tkvěl v tom, že bylo potřeba v nastavení přepnout z DIN přírub (DIN Flanges) na uživatelem specifikované příruby (User Specified Flanges). Vhodnější software by uživatele okamžitě upozornil na nutnost změny nastavení a neumožnil by přepsat hodnotu, která se ve skutečnosti nepřepíše.

Pro ukázkou pracovního prostředí je uveden obrázek 11, kde je zobrazeno přichycení komponenty. Jako první komponenta musí být zadán plášť a poté se součásti připojují k některé předcházející komponentě, přičemž připojení nelze provést v modelu, ale dělá se zadáním pozice na ose.

Za velkou výhodu softwaru je považováno tlačítko Just like (právě jako), viz obrázek 11, které způsobí automatické vyplnění údajů o geometrii a materiálech na základě jiné komponenty. To ulehčuje práci při zadávání komponent.

EN13445:2014 Issue 4:2017 11 FLANGE DESIGN Ver.:18.0:02

1 COMPONENT ATTACHMENT/LOCATION

1-12 Attachment

<input checked="" type="radio"/>	1	S1.1	Cylindrical Shell	L_Main Shell	
<input type="radio"/>	2	E3.1	Torispherical End	L_dno	S1.1
<input type="radio"/>	3	F.2	RT - Flange	L_piruba2	T.1
<input type="radio"/>	4	S1.2	Cylindrical Shell	L_plast2	F.2
<input type="radio"/>	5	F.3	RT - Flange	L_piruba3	S1.2
<input type="radio"/>	6	F5.1	Bolted Flat End	L_viko	F.3

1-2 Location

☐ 1 Along z-axis zo= 0

☒ 2 Along z-axis z1= 6200

CONNECT COMPONENT : F.1 Flange
E3.1 is connected to S1.1 at zo= 0
F.1 is connected to S1.1 at z1= 6200

1-4 Flange Design Method

☒ 1 Section 11 - Taylor Forge

☐ 2 Annex G - Alternative design rules for flanges and gasketed flange connections.

☐ 3 Include a standard ANSI, DIN or EN flange without performing detailed calculations.

☐ 4 Include a standard ANSI, DIN or EN flange INCLUDING Blind Flange without performing detailed calculations.

Help Coordinate System Help Comp.Location Just Like Import Input Data

1 Component attachm... 2 General design dat... 3 Type of flange and... 4 Shell/nozzle data 5 Flange data 6 Data for flange hu... 7 Bolting data 8 Gasket data 9 Calculation

Cancel Options Calculate Previous Next

1 COMPONENT ATTACHMENT/LOCATION
2 GENERAL DESIGN DATA
3 TYPE OF FLANGE AND GASKET FACIN...
4 SHELL/NOZZLE DATA

☐ Single Screen
☒ Multiple Screens
☒ Print Utilization Chart

F.1 L_piruba1 Conn.ID:S1.1 Units: SI

Obrázek 11 Zadávání komponenty ve VVD

4.2.3 Práce v softwaru PV Elite

Před tím, než uživatel začne zadávat komponentu, musí definovat, v jakých jednotkách chce zadání provádět. Pokud uživatel nezmění databázi jednotek, tak jsou jako výchozí jednotky použity stopy, palce, libry a další imperiální jednotky angloamerické měrné soustavy. Ukázka nastavení jednotek uživatelem je na obrázku 12.

Create a New Units File

Name	System Unit	Constant	User Unit
Length	feet	* 304.8000	= mm
Force	pounds	* 4.4480	= N
Mass(dynamics)	pounds	* 0.4536	= kgm
Area	sq.-inches	* 0.000645	= m2
Moments	foot-pounds	* 1.3563	= N-m
Stress	lbs./sq.in.	* 0.00689476	= N/mm2
Temperature Scale	degrees F	* 0.5556	= C
Pressure	psig	* 0.00689476	= N/mm2
Elastic Modulus	lbs./sq.in.	* 0.00689476	= N/mm2
Pipe Density	lbs./cu.in.	* 27680.0	= kg/m3
Insulation Density	lbs./cu.ft.	* 16.0183	= kg/m3
Fluid Density	lbs./cu.ft.	* 16.0183	= kg/m3
Wind Speed	miles/hr	* 0.44703	= m/sec
Tray Weight	lb./sq.ft.	* 47.8790	= N/m2
Inertia	in.**4	* 416231	= mm**4
G Load	g's	* 1.0000	= g's
Wind Load	lbs./sq.ft	* 47.8790	= N/m2
Elevation	feet	* 304.8000	= mm
Volume	cubic inches	* 0.00001639	= m3
Diameter	inches	* 25.4000	= mm
Wall Thickness	inches	* 25.4000	= mm

Obrázek 12 Nastavení jednotek v softwaru PV Elite

Na obrázku 13 jsou zobrazena zadávací pole pro komponentu v PV Elite. Pod zadávacími poli se nachází nápověda pro aktuálně vyplňovanou položku. Uživatelská přívětivost je postačující, nicméně dala by se vylepšit náčrtem pro zadávané údaje. Dále je nevýhodou to, že zadávané hodnoty nejsou označeny značkou pro dané veličiny v normě. Na druhou stranu při kontrole vstupů může být výhodou, že výčet zadaných hodnot je uveden v jedné tabulce.

Element Data	
Element Description	
From Node	10
To Node	20
Element Type	Cylindrical ▼
Diameter Basis	OD ▼
Outside Diameter, mm	1024
Cylinder Length, mm	6200
Finished Thickness, mm	11.7
Nominal Thickness, mm	12
Internal Corrosion Allowance, mm	4
External Corrosion Allowance, mm	0
Wind Diameter Multiplier	1.2
Material Name	P235GH ...
Longitudinal Seam Efficiency	1 ...
Circumferential Seam Efficiency	1 ...
Internal Pressure, N/mm ²	1.5
Temp. for Internal Pressure, C	185
External Pressure, N/mm ²	0
Temp. for External Pressure, C	20
Additional Element Data	
Material Name Enter the material's name and then press [Enter] or use the database button to select it.	

Obrázek 13 Zadávání komponenty v PV Elite

4.3 Možnosti materiálových databází

Při zadávání materiálů do softwarů bylo zjištěno, že některé materiály z normy ČSN EN 13445-2 [13] v databázi chybí. V softwaru **Sant'Ambrogio** se jedná například o materiály: X2CrNiMo17-12-3, X2CrNiMoN17-13-5, X8CrNiNb16-13, X2CrNiMoN17-13-3 a X3CrNiMoN17-13-3. Výhodou materiálové databáze Sant'Ambrogio je to, že umožňuje snadné vyhledávání.

Ve **VVD** chybí například materiály X8CrNiNb16-13, X3CrNiMoN17-13-3. Vyhledávání v materiálové databázi VVD není zcela intuitivní, musí být zadáno kritérium, podle kterého se má vyhledávat, např. podle čísla materiálu, označení, minimální nebo maximální tloušťky, tepelného zpracování.

V softwaru **PV Elite** nebyly zjištěny chybějící materiály. Celkem databáze obsahuje 1832 možností, avšak nejedná se vždy o různé druhy materiálů, protože každý rozsah tloušťky určitého materiálu má specifické vlastnosti, takže je veden samostatně. Vyhledávání je snadné, lze podle názvu materiálu i čísla materiálu, ale vyhledávací kritérium uživatel nezadá, software prověří všechny sloupce databáze.

Při procházení materiálových databází byla zjištěna nesrovnalost v normě ČSN EN 13445-2 [13]. Nebylo možné vyhledat materiál X2CrNiMoN17-12-2 v softwarech Sant'Ambrogio, VVD a PV Elite, proto jsem začala pátrat dále. Materiál s číslem materiálu 1.4406 je pro tvar výrobku plech a pás uveden pod značkou X2CrNiMoN17-12-2, zatímco pro výkovek je označen jako X2CrNiMoN17-11-2, což ukazuje tabulka 2.

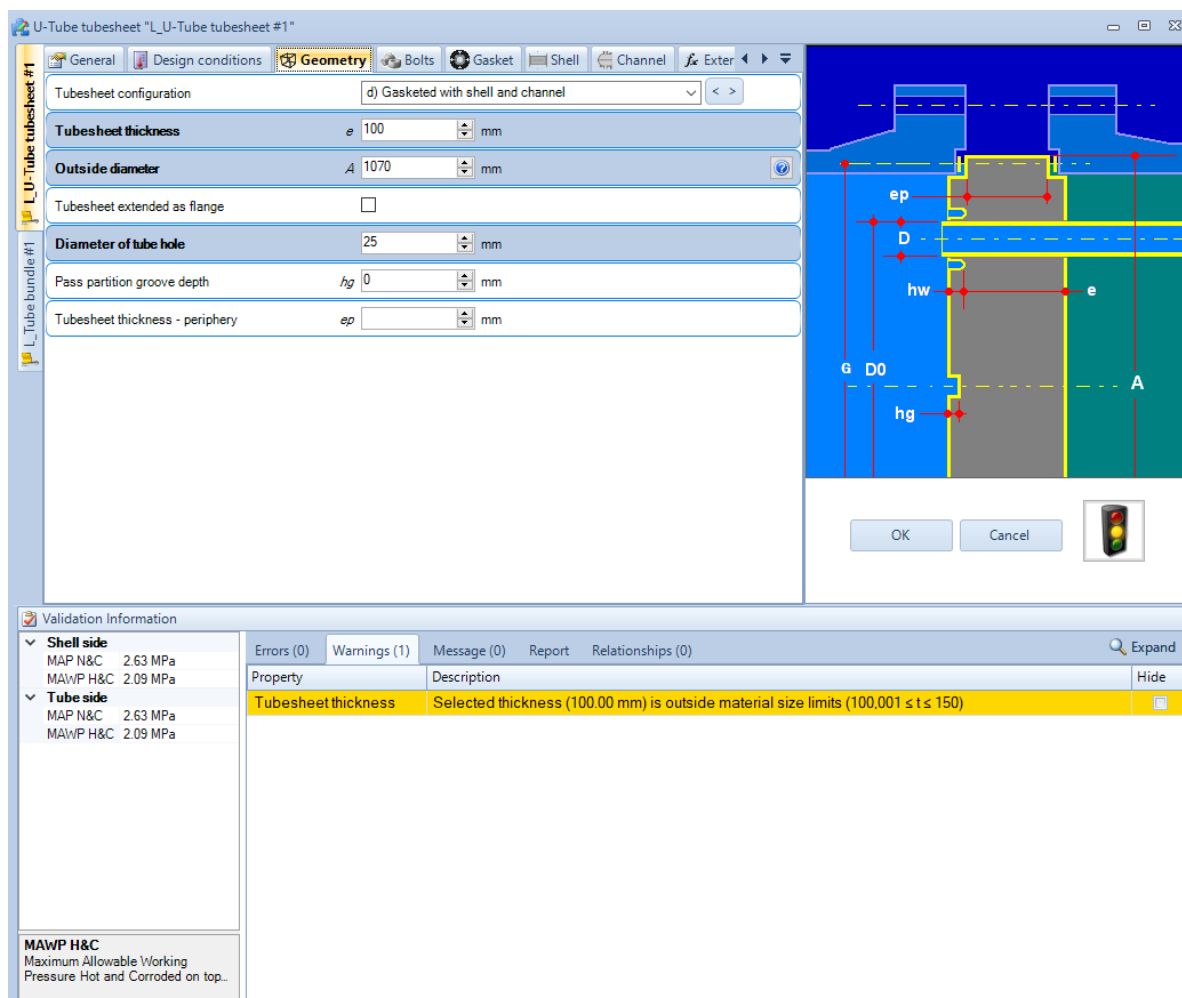
Tabulka 2 Nesrovnalost v Tabulce E.2-1 normy ČSN EN 13445-2 [13].

Číslo	Tvar výrobku	Evropská norma	Druh materiálu	Značka	Číslo materiálu
87	Plech a pás	EN 10028-7	Korozivzdorná ocel, austenitická	X2CrNiMoN17-12-2	1.4406
394	Výkovek	EN 10222-5	Korozivzdorná ocel, austenitická	X2CrNiMoN17-11-2	1.4406

Po dohledání materiálu v normě ČSN EN 10028-7 [14] a také v normě ČSN EN 10222-5 [15], bylo prověřeno, že správné označení materiálu je X2CrNiMoN17-11-2.

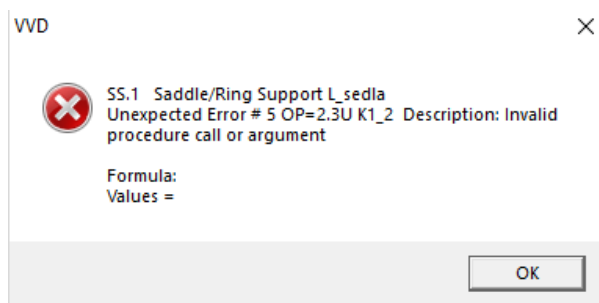
4.4 Upozornění a varování softwaru

Přehlednější systém hlášek nabízí **Sant'Ambrogio**. Pod zadávanými hodnotami se objevují hlášení o chybách a varování, která okamžitě reagují na uživatelské zadání. Většinou jsou hlášky užitečné a pomáhají uživateli optimalizovat zadávané hodnoty. Jedná se o upozornění na nedostatečnou tloušťku či jiné nesrovnalosti mezi parametry definovanými uživatelem. Obrázek 14 ilustruje, že je dbáno na soulad zadané tloušťky a rozsah tloušťky vybraného materiálu. V tomto případě byla vybrána tloušťka 100 mm, ale materiál s rozsahem tloušťky „<100,001;150)“ mm. Upozornění softwaru pomohlo tuto chybu způsobenou uživatelem opravit.



Obrázek 14 Upozornění Sant'Ambrogio

V softwaru **VVD** jsou chybové hlášky pro běžného uživatele nesrozumitelné, což potvrzuje obrázek 15. Danou chybu je nutné dohledat v uživatelském manuálu. Navíc tento software neupozorní uživatele okamžitě, ale až při snaze o potvrzení komponenty.



Obrázek 15 Upozornění VVD

Upozornění softwaru **PV Elite** jsou snadno srozumitelná. Software uvádí příčinu varování (plášť je delší než 4572 mm) a také, jaké to bude mít následky (negativně to ovlivní výsledky zatížení od zemětřesení), viz obrázek 16. Pro řešený výměník tepla není předpokládáno zatížení od zemětřesení, takže není nutné se tímto upozorněním dále zabírat.

Long Cylinder Input Warning



The cylinder that was just entered in was greater than 4572 mm in length. Use of such long cylinders can degrade the results of the seismic calculations.

The shell course length should correspond with commonly available plate sizes.

I realize that it is not a good idea to use such long cylinders, but there is no need to warn me about this in the future. ☐

OK

Obrázek 16 Upozornění PV Elite

4.5 Výstupní protokol (report)

Při práci se softwarem **Sant'Ambrogio** byla objevena nesrovnalost mezi označením požadovaných rozměrů a označením rozměrů ve výpočtu, viz dále Plášť v softwaru Sant'Ambrogio. Některé vzorce jsou v reportu provedeny po grafické stránce v nedostatečné kvalitě, takže působí rozmazaně, což potvrzuje ukázka výpočtu na obrázku 17. U některých veličin je uveden pouze finální výsledek bez obecného vzorce, takže to znesnadňuje replikaci výpočtu uživatelem.

$$\begin{aligned}
 e_s &= \frac{PR'}{2f_z - 0.5P} + c + ce + \delta = 10.06 \text{ mm} \\
 e_y &= \frac{\beta P(0.75R + 0.2D_i)}{f} + c + ce + \delta = 10.72 \text{ mm} \\
 e &= \max(e_y; e_s) = 10.72 \text{ mm} \\
 e(sf) &= 10.45 \text{ mm} \\
 en(sf) &\geq e(sf): \text{ Ok} \\
 en &\geq e: \text{ Ok}
 \end{aligned}$$

Obrázek 17 Ukázka výpočtu v Sant'Ambrogio

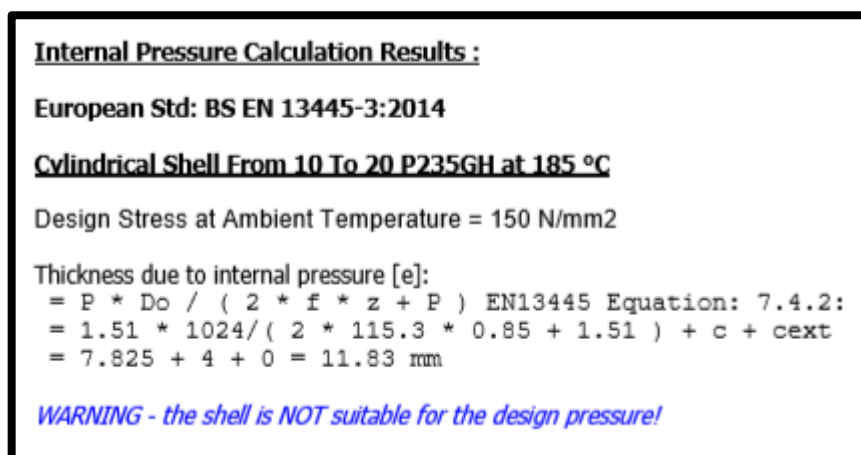
Výhodou výstupního protokolu **VVD** je to, že je do vzorců dosazeno i numericky. U některých vzorců uvádí číslo, pod jakým lze vzorec nalézt v normě ČSN EN 13445-3 [1]. Vzorce jsou psány pouze ve formě textu, ne ve formátu rovnic, takže je zpočátku obtížné se v nich zorientovat, příklad výpočtu je uveden na obrázku 18.

```

Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. emin :
emin = De * P / (2 * f * z + P) (7.4-2)
=1024*1.5098/(2*124.53*0.85+1.5098)= 7.2512 mm
Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :
emina = emin + c + NegDev =7.25+4+0.3= 11.55 mm
Analysis Thickness
ea = en - c - NegDev =12-4-0.3= 7.7000 mm
    
```

Obrázek 18 Ukázka výpočtu ve VVD

V softwaru **PV Elite** jsou výpočty doplněny četnými komentáři. Na obrázku 19 je ukázka toho, že software vyhodnotil plášť jako neschopný odolávat konstrukčnímu tlaku. O tom, v čem nastala chyba bude pojednáno později, při vyhodnocení výsledků pláště.



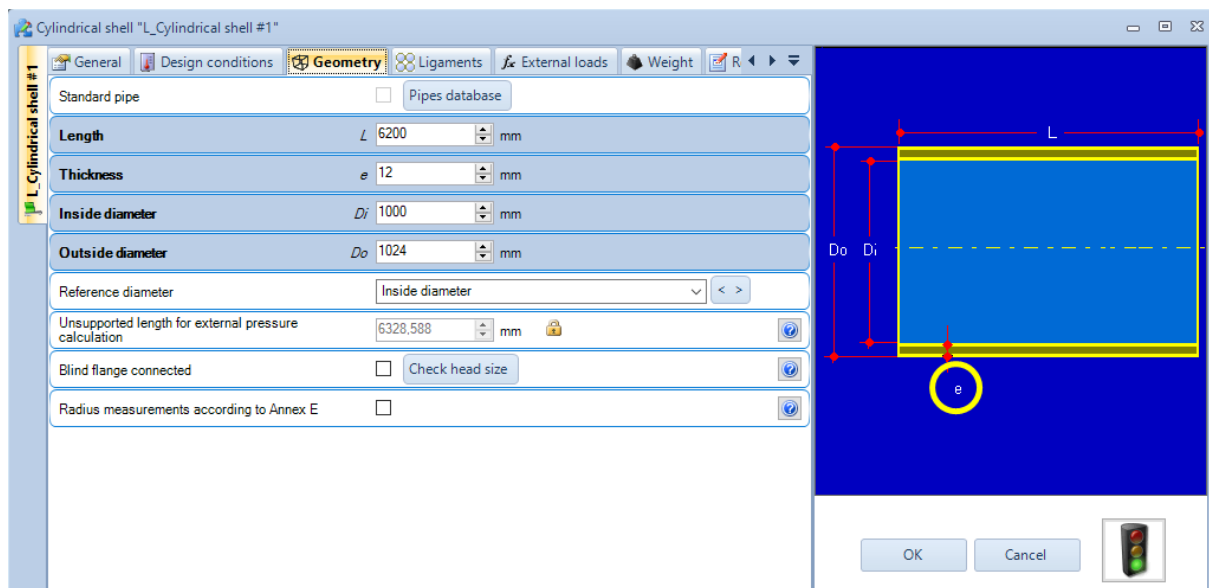
Obrázek 19 Ukázka výpočtu v PV Elite

5 NESROVNALOSTI V SOFTWARECH

V této kapitole je upozorněno na některé nesrovnalosti, které se objevují v softwarech.

5.1 Plášť v softwaru Sant'Ambrogio

Při zadávání pláště jsou požadovány rozměry délky, tloušťky a řídicího průměru, druhý průměr je dopočítán, např. pro vnitřní řídicí průměr je automaticky doplněn rozměr vnějšího průměru. Zajímavostí je to, že řídicí průměr lze zvolit u pláště, ale u torosférického dna musí být jako referenční průměr zadán vnitřní. Obrázek 20 zobrazuje prostředí softwaru Sant'Ambrogio při zadávání geometrie pláště.



Obrázek 20 Zadání pláště do softwaru Sant'Ambrogio

Bylo velmi zářející, že software vyžaduje zadání tloušťky e , což podle normy ČSN EN 13445-3 [1] znamená požadovanou tloušťku, viz obrázek 23 (Definice tlouštěk dle ČSN EN 13445-3 [1]). Tuto tloušťku je obtížné zjistit, protože na konstrukčních výkresech bývá uvedena jmenovitá tloušťka, podle normy značená e_n . Proto byla hledána příčina ve výstupním protokolu softwaru Sant'Ambrogio. Ukázalo se, že v geometrii pláště ve výstupním protokolu softwaru Sant'Ambrogio je uvedena jmenovitá tloušťka s označením e_n . Znamená to tedy, že software požaduje jinou tloušťku, než která je dosazena do vzorců. Pro uživatele to může být velmi matoucí, než zjistí, v čem je chyba. Toto je považováno za nesrovnalost a chybu v softwaru.

Tabulka 3 Geometrie pláště ve výstupním protokolu softwaru Sant'Ambrogio.

Anglický termín	Český termín	Označení rozměru	Hodnota rozměru [mm]
Inside diameter	Vnitřní průměr skořepiny	D_i	1000
Outside diameter	Vnější průměr skořepiny	D_e	1024
Length	Délka	L	6200
Nominal thickness	Jmenovitá tloušťka	e_n	12
Corrosion allowance	Přídavek na korozi	c	4
Undertolerance	Záporná tolerance	δ	0,3

Do softwaru Sant'Ambrogio nebylo možné pro plášť vyplnit zatížení hydrostatickým tlakem vyšší, než je výška vodního sloupce v plášti. To je považováno za nevýhodu, protože mohou nastat případy, kdy bude do pláště vcházet dlouhé potrubí zaplněné vodou, což výrazně navýší hydrostatický tlak v plášti. V případě zadání této bakalářské práce by se jednalo pouze o navýšení od vody v hrdle. Aby byly porovnatelné výsledky, tak byl tento vliv zanedbán i v softwarech VVD a PV Elite. Výška vodního sloupce pro výpočet hydrostatického tlaku byla tedy uvedena pouze jako 1000 mm, což odpovídá vnitřnímu průměru pláště.

5.2 Torosférické dno v softwaru Sant'Ambrogio

Ve výpočtu torosférického dna v softwaru Sant'Ambrogio se objevila nesrovnalost ve výpočtu poměru X (ratio X). Je uveden vzorec $X=r/D_i$, což po dosazení hodnot vychází 0,154. Jak je ukazuje obrázek 21, podle softwaru tato hodnota vyšla 0,15695.

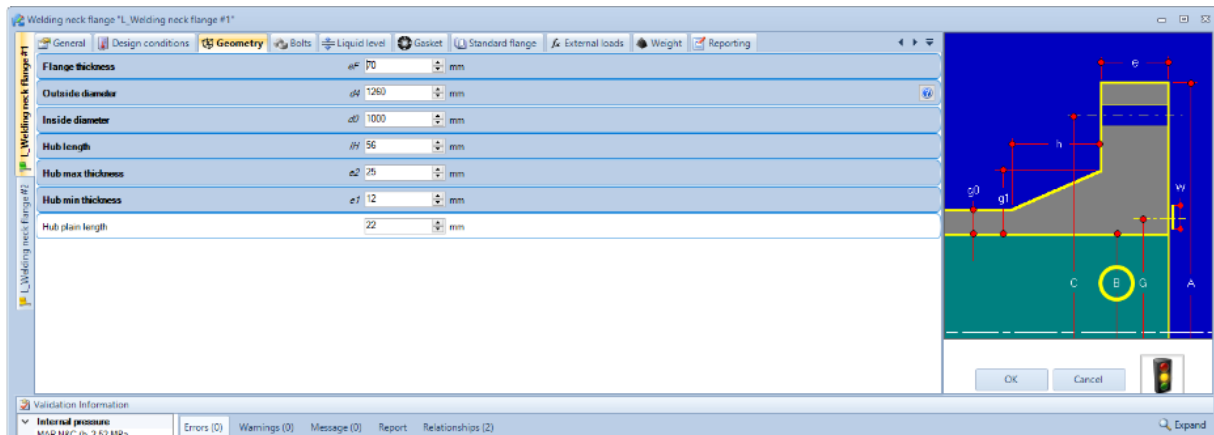
Po zamyšlení nad touto nesrovnalostí se ukázalo, že software Sant'Ambrogio spočítal poměr X dosazením vnitřního poloměru křivosti anuloidového přechodu (r) i vnitřního průměru válcového lemu dna (D_i) při zkorodovaném stavu. Ve spodní části obrázku 21 je vidět, že tento software označuje zkorodovaný stav přidáním apostrofu, tudíž by měl apostrofem označit i veličiny pro výpočet poměru X. Jedná se tedy pouze o chybu ve značení, výpočet je proveden správně.

Geometry			
Inside diameter	D_i	=	1 000.00 mm
Outside diameter	D_o	=	1 024.00 mm
Head outside height	H	=	326.47 mm
Nominal thickness	en	=	12.00 mm
Minimum head thickness after forming	t-c'	=	11.70 mm
Corrosion allowance	c	=	4.00 mm
External corrosion allowance	ce	=	0 mm
Undertolerance	δ	=	0.30 mm
Straight flange length	l(sf)	=	60.00 mm
Straight flange undertolerance	δ (sf)	=	0.30 mm
Straight flange thickness	en(sf)	=	12.00 mm
Straight flange joint efficiency	z(sf)	=	1.00000
Knuckle thickness	en(k)	=	12.00 mm
Inside spherical radius of central part of torispherical head	R	=	800.00 mm
Inside knuckle radius	r	=	154.00 mm
Internal pressure			
Overpressure due to static head	Ph	=	0.0098 MPa
Calculation pressure	$P=P_i+P_h$	=	1.51 MPa
Parameter Y	$Y=\min(ec/R;0.04)$	=	0.00798
Parameter Z	$Z=\log_{10}(1/Y)$	=	2.09820
Ratio X	$X=r/D_i$	=	0.15695
Parameter N	$N = 1006 - \frac{1}{[62 + (90Y)^4]}$	=	0.85133
Parameter $\beta_{0.1}$	$\beta_{0.1} = N(-0.1833Z^3 + 10383Z^2 - 12943Z + 0.837)$	=	0.85063
Parameter $\beta_{0.2}$	$\beta_{0.2} = \max[0.95(0.56 - 194Y - 82.5Y^2), 0.5]$	=	0.51231
Parameter β	$\beta = 10[(0.2 - X)\beta_{0.1} + (X - 0.1)\beta_{0.2}]$	=	0.65796
Joint efficiency	z	=	0.85000
Inside spherical radius of central part of torispherical head	$R'=R+c$	=	804.30 mm
Inside diameter	$D_i'=D_i+2\cdot c$	=	1 008.60 mm
Inside knuckle radius	$r'=r+c$	=	158.30 mm

Obrázek 21 Vyhodnocení torosférického dna v Sant'Ambrogio

5.3 Nesoulad v označení příruby v Sant'Ambrogio

Během zpracování práce došlo ke změně normalizovaných nakupovaných přírub na příruby vyráběné na míru. Po zadání této změny nekorespondovalo označení rozměrů a kót v náčrtu, viz obrázek 22. Jedná se například o vnitřní průměr, který je v náčrtu značen jako B, zatímco v zadávacím poli jako d0. Tato nesrovnalost se při dalším otevření softwaru již neobjevila u žádné příruby.

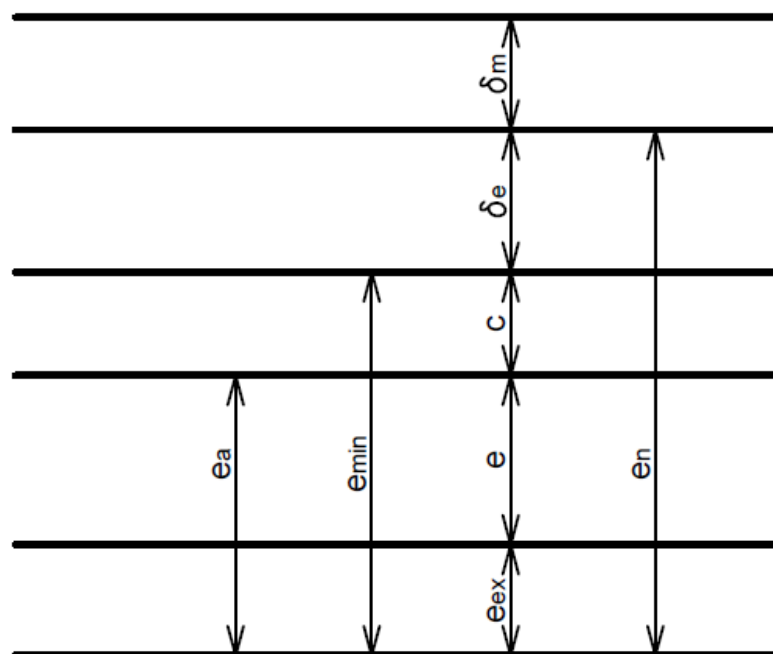


Obrázek 22 Jiné označení zadávacího pole a kóty na náčrtu v Sant'Ambrogio

6 POROVNÁNÍ POUŽÍVANÝCH SOFTWAREŮ NA ZÁKLADĚ VÝSLEDKŮ

V této části jsou porovnávány výpočty pláště a torosférického dna ze softwarů Sant'Ambrogio, VVD a PV Elite. Tyto softwary byly vybrány z toho důvodu, že umožňují návrh na základě vzorců podle normy EN 13445. V případě neshody výsledků je hledána příčina v normě ČSN EN 13445-3 [1] a dalších provázaných normách.

Pro určení požadované tloušťky na základě normy ČSN EN 13445-3 [1] je možné provést dva typy výpočtů. Jedná se o přímý způsob a iterační kontrolu. V případě přímého způsobu se do vzorců zavádí přímo požadovaná tloušťka, při použití iterační kontroly je prověřováno, zda je analyzovaná tloušťka odpovídající. Tyto výpočty musí být realizovány pro situaci, kdy došlo k maximální předpokládané korozi všech zahrnutých rozměrů, např. tloušťky a průměru. [1] Pro lepší přehlednost je uveden obrázek 23, kde jsou znázorněny jednotlivé tloušťky.



Obrázek 23 Definice tlouštěk dle ČSN EN 13445-3 [1]

Legenda

- e** požadovaná tloušťka
- e_n** jmenovitá tloušťka
- e_{min}** minimální přijatelná výrobní tloušťka
- e_a** analyzovaná tloušťka
- c** přídavek na korozi
- δ_e** absolutní hodnota možné záporné tolerance na jmenovité tloušťce (např. z materiálových norem)
- δ_m** přídavek na možné zeslabení během výrobního procesu
- e_{ex}** tloušťka přidaná navíc pro doplnění na jmenovitou tloušťku

6.1 Plášť

Některé údaje v reportech softwarů Sant'Ambrogio, VVD a PV Elite se neshodovaly, proto byl proveden vlastní podrobný výpočet dle normy ČSN EN 13445-3 [1]. Nejdříve je uveden vlastní výpočet, poté jsou rozebrány údaje ze softwarů pro tloušťky pláště, poté maximální přípustné tlaky pláště a na závěr jsou srovnány nejdůležitější veličiny.

6.1.1 Vlastní výpočet

Veškeré výpočty pláště jsou dodány jako příloha práce. V tomto textu je popsán postup výpočtu, který může sloužit jako návod, jak postupovat při výpočtu pláště.

Pro výpočet pláště podle normy ČSN EN 13445-3 [1] byly nejdříve určeny materiálové charakteristiky. Zvolený materiál P235GH byl vyhledán v normě ČSN EN 13445-2 [13], v níž bylo v tabulce E.2-1 zjištěno, že bližší informace o materiálu P235GH jsou obsaženy v normě ČSN EN 10028-2 [14]. Tyto údaje jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4 Vlastnosti materiálu P235GH.

Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka	Zdroj údajů
Horní mez kluzu	R_{eH}	235	MPa	ČSN EN 10028-2, tabulka 3
Pevnost v tahu	R_m	360 ⁵	MPa	ČSN EN 10028-2, tabulka 3
Tažnost	A	24	%	ČSN EN 10028-2, tabulka 3
Minimální hodnota smluvní meze kluzu 0,2 %	$R_{p0,2}$	186,8 ⁶	MPa	ČSN EN 10028-2, tabulka 4
Maximální dovolené namáhání pro případy normálního zatížení	f_d	124,53 ⁷	MPa	ČSN EN 13445-3, tabulka 6-1
Maximální dovolené namáhání pro případy zkušebního zatížení	f_{test}	223,81 ⁸	MPa	ČSN EN 13445-3, tabulka 6-1
Dovolené namáhání pro normální případy provozního zatížení materiálu uvažované části při zkušební teplotě	f_a	150 ⁹	MPa	ČSN EN 13445-3, tabulka 6-1

Dále byla počítána požadovaná tloušťka pláště (e). Pro výpočet požadované tloušťky válcové skořepiny dle normy ČSN EN 13445-3 [1] je možné použít následující vzorec:

$$e = \frac{PD_i}{2f_z - P} \quad (1)$$

⁵ Volí se nejnižší hodnota z rozsahu.

⁶ Hodnota vznikla lineární aproximací, platí pro výpočtovou teplotu 185 °C.

⁷ Do výpočtu se dosazuje smluvní mez kluzu 0,2 % ($R_{p0,2}$) při výpočtové teplotě.

⁸ Do výpočtu se dosazuje smluvní mez kluzu 0,2 % ($R_{p0,2}$) při zkušební teplotě, tj. 20 °C. V tomto případě byla dosazena horní mez kluzu (R_{eH}) při 20 °C, což norma umožňuje, pokud není v materiálové normě uvedena příslušná $R_{p0,2}$.

⁹ Do výpočtu se dosazuje smluvní mez kluzu 0,2 % ($R_{p0,2}$) při zkušební teplotě, tj. 20 °C.

$$e = \frac{PD_e}{2f_z + P} \quad (2)$$

Vzorec (1) je v normě označen jako (7.4-1), vzorec (2) jako (7.4-2). Význam veličin popisuje tabulka 5. Při použití vzorců je nutné si uvědomit, zda dochází k úbytku materiálu vlivem koroze kvůli produktu obsaženému v nádobě nebo vlivem okolí. Tento faktor ovlivňuje, jaká bude hodnota vnitřního a vnějšího průměru.

Tabulka 5 Veličiny pro výpočet požadované tloušťky pláště.

Značka	Veličina	Hodnota	Jednotka
P	Výpočtový tlak ¹⁰	1,50981	MPa
D _i	Vnitřní průměr skořepiny ¹¹	1008,6	mm
f	Dovolené namáhání ¹²	124,53	MPa
z	Součinitel hodnoty spoje ¹³	0,85	–
D _e	Vnější průměr skořepiny ¹⁴	1024	m

Na základě vzorce (1) byla určena požadovaná tloušťka $e = 7,2448 \text{ mm}$, podle vzorce (2) $e = 7,2513 \text{ mm}$. Pro zaručení bezpečnějšího návrhu je dále uvažována vyšší hodnota požadované tloušťky. Po přičtení korozního přídávku (c) a absolutní hodnoty záporné tolerance (δ_e) je získána tloušťka dle vzorce (3). Vypočítaná tloušťka ke srovnání nemá dané označení podle normy.

$$e + c + \delta_e = 7,2513 \text{ mm} + 4 \text{ mm} + 0,3 \text{ mm} = 11,5513 \text{ mm} \quad (3)$$

Jmenovitá tloušťka (e_n) je uvedena na výkrese. Pro tento případ je $e_n = 12 \text{ mm}$. Kontrola tloušťky se provede porovnáním výsledku vzorce (3) a jmenovité tloušťky, tedy $11,5513 \text{ mm} < 12 \text{ mm}$. Požadovaná tloušťka včetně přídávků je menší než jmenovitá tloušťka, takže se jedná o bezpečný návrh tloušťky pláště.

Dalším krokem bylo určení maximálního přípustného tlaku (P_{\max}), což lze dle normy ČSN EN 13445-3 [1] pomocí následujícího vzorce:

$$P_{\max} = \frac{2f_z e_a}{D_m} \quad (4)$$

Tento vzorec (4) je v normě označen jako (7.4-3). V tabulce 6 je uveden význam použitých veličin. Při použití vzorce musí být uvažovány různé případy zatížení. Jako

¹⁰ Výpočtový tlak byl určen jako součet konstrukčního tlaku a hydrostatického tlaku média, v tomto případě vody.

¹¹ Vzhledem k tomu, že dochází ke korozi působením vody, tak se mění hodnota vnitřního průměru během provozu zařízení. Na výkresech se uvádí hodnota vnitřního průměru při původním, tj. nezkorodovaném stavu. Ve výpočtu musí být uvažován nejhorší možný případ, tzn. došlo k takové korozi, jako je hodnota přídávku na korozi a současně je uvažována veškerá záporná výrobní tolerance.

¹² Je uvažováno maximální dovolené namáhání pro případy normálního zatížení, tj. $f = f_d$.

¹³ Součinitel hodnoty spoje se určí podle zkušební skupiny, v tabulce 5.6-1 ČSN EN 13445-3 [1].

¹⁴ Vnější průměr se v tomto případě nemění, protože nedochází ke korozi vlivem okolní atmosféry.

maximální přípustný tlak pláště je poté vybrán ten, který má ze všech případů nejnižší hodnotu.

Tabulka 6 Veličiny pro výpočet maximálního přípustného tlaku pláště.

Značka	Veličina	Jednotka
f	Dovolené namáhání	MPa
z	Součinitel hodnoty spoje	–
e _a	Analyzovaná tloušťka	mm
D _m	Střední průměr skořepiny	mm

Tabulka 6 neuvádí hodnoty veličin, protože se liší pro daný případ. Jedná se o případy: zkorodovaný stav při konstrukční teplotě, nezkorodovaný stav při okolní teplotě a zkušební případ zatížení.¹⁵ Po aplikaci vzorce (4) na různé případy zatížení byl určen maximální přípustný tlak pro plášť $P_{max} = 1,6040 \text{ MPa}$.

Podle normy ČSN EN 13445-5 [16] byl vypočítán zkušební tlak pro standardní hydraulickou zkoušku použitím následujících vzorců:

$$P_t = \frac{1,25 P_d f_a}{f_{T_d}} \quad (5)$$

$$P_t = 1,43 P_s \quad (6)$$

Význam použitých veličin je vysvětlen v tabulce 7.

Tabulka 7 Veličiny pro výpočet zkušebního tlaku pláště.

Značka	Veličina	Hodnota	Jednotka
P _d	Konstrukční tlak pro případ nejvyššího zatížení tlakem	1,5	MPa
f _a	Dovolené namáhání pro normální případy provozního zatížení materiálu uvažované části při zkušební teplotě ¹⁶	150	MPa
f _{T_d}	Dovolené namáhání pro normální případy provozního zatížení materiálu uvažované části při konstrukční teplotě T _d	124,53	MPa
P _s	Nejvyšší dovolený tlak nádoby	1,5	MPa

Vzorec (5) je v normě ČSN EN 13445-5 [16] označen jako (10.2.3.3.1-1) a vzorec (6) jako (10.2.3.3.1-2). Zkušební tlak měřený v nejvyšším bodě komory nádoby ve zkušební poloze (P_t) byl vybrán jako vyšší hodnota po dosazení do vzorců (5) a (6), tím byla získána hodnota pro zkušební tlak $P_t = 2,2585 \text{ MPa}$. Tato hodnota musí být menší než maximální zkušební tlak (P_{tmax}), což vyšlo jako $P_{tmax} = 5,1704 \text{ MPa}$. Podmínka $P_t < P_{tmax}$ pro provádění hydraulické tlakové zkoušky je tedy splněna.

¹⁵ Zkušební případ zatížení znamená také nezkorodovaný stav při okolní teplotě, ale liší se dosazením za dovolené namáhání (f) a součinitel hodnoty spoje (z).

¹⁶ Tato definice znamená, že se hodnota určí podle tabulky 6-1 v normě ČSN EN 13445-3 [1]. Zkušební teplota je 20 °C. Platí tedy f_a = f_d určené pro teplotu 20 °C.

6.1.2 Tloušťka pláště podle softwarů

V tabulce 8 jsou uvedeny tloušťky pláště vypočítané v softwarech Sant'Ambrogio, VVD a PV Elite, bližší podrobnosti lze najít v přílohách. Pro lepší orientaci v označení tlouštěk byl v úvodu kapitoly uveden obrázek 23.

Tabulka 8 Vypočítané tloušťky pláště.

Použitý software	Anglický termín	Český termín	Označení rozměru	Hodnota rozměru [mm]
SA	Minimum required thickness	Minimální požadovaná tloušťka	e^{17}	11,55
VVD	Required minimum shell thickness excl. allow.	Minimální požadovaná tloušťka skořepiny bez přídávku	e_{min}^{18}	7,2512
	Required minimum shell thickness incl. allow.	Minimální požadovaná tloušťka skořepiny včetně přídávku	e_{min}^{19}	11,55
	Analysis thickness	Analýzovaná tloušťka	e_a^{20}	7,7
PVE	Required thickness	Požadovaná tloušťka	e^{21}	11,83 ²²

Značení tlouštěk neodpovídají značení podle normy ČSN EN 13445-3 [1], pokud by se výpočtář slepě držel označení v reportech softwarů, tak by došlo k chybnému vyhodnocení. Je proto nutné se zamyslet nad postupem výpočtu, případně provést vlastní výpočet.

Softwarý Sant'Ambrogio a VVD vyžadují (bez ohledu na vlastní značení softwarů) jmenovitou tloušťku (e_n), přírůstek na korozi (c) a zápornou výrobní toleranci (δ_e). Softwarý spočítají požadovanou tloušťku podle vzorce (7.4-2) normy ČSN EN 13445-3 [1], k této tloušťce přičtou přírůstek na korozi (c) a zápornou výrobní toleranci (δ_e), výsledek porovnají se zadanou jmenovitou tloušťkou komponenty (e_n).

Zajímavostí je, že software PV Elite požaduje od uživatele údaj o tzv. konečné tloušťce (finished thickness), tzn. uživatel odečte zápornou výrobní toleranci (δ_e) od jmenovité tloušťky (e_n), zde $12 \text{ mm} - 0,3 \text{ mm} = 11,7 \text{ mm}$. Software spočítá požadovanou tloušťku podle vzorce (7.4-2) normy ČSN EN 13445-3 [1] a k této tloušťce (e) přičte přírůstek na korozi (c). Poté výsledek součtu porovnává se zadanou konečnou tloušťkou komponenty (finished thickness). Pro plášť je tento přístup výpočtu rovnocenný přístupu Sant'Ambrogio a VVD.

¹⁷ Podle normy ČSN EN 13445-3 [1] je označení e zavedeno pro požadovanou tloušťku, tzn. bez uvažování přírůstků.

¹⁸ Podle normy ČSN EN 13445-3 [1] označení e_{min} znamená minimální přijatelnou výrobní tloušťku.

¹⁹ Označení e_{min} není v normě ČSN EN 13445-3 [1] uvedeno, spočítaná tloušťka nemá dle normy označení.

²⁰ Označení e_a v normě ČSN EN 13445-3 [1] odpovídá analyzované tloušťce.

²¹ Podle normy ČSN EN 13445-3 [1] je označení e zavedeno pro požadovanou tloušťku, tzn. bez uvažování přírůstků.

²² Software PV Elite tuto tloušťku porovnává vůči konečné tloušťce 11,7 mm, vyhodnotil tedy, že tloušťka není dostačující. Ve skutečnosti je hodnota 11,83 mm špatně určená, protože PV Elite použil špatný údaj pro dovolené namáhání (f_d).

6.1.3 Tlaky pro plášť podle softwarů

V tabulce 9 jsou uvedeny tlaky pláště vypočítané v softwarech Sant'Ambrogio, VVD a PV Elite, bližší podrobnosti lze najít v přílohách.

Tabulka 9 Vypočítané tlaky pro plášť.

Použitý software	Anglický termín	Český termín	Označení tlaku	Hodnota tlaku [MPa]
SA	Maximum allowable test pressure	Maximální dovolený zkušební tlak	–	5,16
	Maximum allowable design pressure	Maximální dovolený konstrukční tlak	–	1,59
	Hydrostatic test pressure	Tlak hydraulické zkoušky	Pt	2,15
VVD	Maximum allowable working pressure (corroded condition at design temp.)	Maximální dovolený pracovní tlak (zkorodovaný stav při konstrukční teplotě)	MAWPHC	1,6040
	Maximum allowable working pressure (uncorroded condition at ambient temp.)	Maximální dovolený pracovní tlak (nezkorodovaný stav při okolní teplotě)	MAWPNC	2,9356 ²³
	Max test pressure (uncorroded cond. at ambient temp.)	Maximální zkušební tlak (nezkorodovaný stav při okolní teplotě)	Ptmax	5,1532 ²⁴
	Required min. hydrostatic test pressure	Požadovaný min. tlak hydraulické zkoušky	Ptmin	2,2585
PVE	Maximum working pressure hot and corroded	Maximální pracovní tlak horký a zkorodovaný	MAWP	1,476 ²⁵
	Maximum pressure new and cold	Maximální tlak nový a studený	MAPNC	3,467
	Uncorrected (for liquid) hydrotest pressure	Nekorigovaný (pro kapalinu) tlak hydraulické zkoušky	–	4,354
	Hydrostatic test pressure results	Výsledky pro tlak hydraulické zkoušky	–	1,122

²³ Software VVD zde špatně uvažuje střední průměr skořepiny $D_m=1016,3$ mm, což je hodnota platná pro zkorodovaný stav. Pro nezkorodovaný stav platí $D_m=1012,3$ mm, vlastním výpočtem hodnota tlaku vyšla jako 2,9472 MPa.

²⁴ Software VVD opět špatně zavádí střední průměr skořepiny jako $D_m=1016,3$ mm. Vlastním výpočtem pro $D_m=1012,3$ mm vyšla hodnota tlaku jako 5,1735 MPa.

²⁵ Software PV Elite vyhodnotil, že konstrukční tlak (1,5 MPa) je vyšší než maximální přípustný tlak (1,476 MPa), tudíž by bylo nutné navýšit tloušťku. Ve skutečnosti je hodnota maximálního přípustného tlaku (1,476 MPa) špatně, protože je dosazená špatná hodnota dovoleného namáhání (f_d). Dále je překvapující, že software ve výpočtu odečítá hydrostatický tlak.

Software Sant'Ambrogio neuvádí postup výpočtu, takže není možné odůvodnit příčiny odchylek od vlastního výpočtu podle normy ČSN EN 13445-3 [1]. Softwary VVD a PV Elite používají značení tlaků inspirované normami ASME [17].

6.1.4 Shrnutí výpočtu pláště

Následující tabulka 10 uvádí hodnoty nejdůležitějších veličin, které se objevují při výpočtu pláště. V této tabulce jsou hodnoty pojmenovány podle normy a je k nim dohledána hodnota ve výpočetních softwarech, nehledě na to, jak si softwary zavedly vlastní značení.

Tabulka 10 Shrnutí výsledků pro plášť.

Veličina	Značka	Jednotka	ČSN EN 13445	SA	VVD	PVE
Dovolené namáhání pro případy normálního zatížení	f_d	MPa	124,53	124,53	124,53	115,34
Vnější průměr skořepiny	D_e	mm	1024	1024	1024	1024
Maximální vnitřní průměr skořepiny	D_i	mm	1008,6	–	1008,6	–
Požadovaná tloušťka	e	mm	7,2513 ²⁶	–	7,2512 ²⁷	7,825 ²⁸
Požadovaná tloušťka včetně přídavků	e_{29}	mm	11,55 ³⁰	11,55 ³¹	11,55 ³²	11,83
Jmenovitá tloušťka	e_n	mm	12	12	12	12
Maximální přípustný zkušební tlak	P_{tmax}	MPa	5,1735	5,16	5,1532 ³³	4,354 ³⁴
Zkušební tlak	P_t	MPa	2,2585	2,15 ³⁵	2,2585	1,122 ³⁶
Maximální přípustný tlak	P_{max}	MPa	1,6040	1,59	1,6040	1,476 ³⁷

²⁶ Na přesnou hodnotu má i vliv zaokrouhlování dovoleného namáhání (f_d). Při přesnosti na 4 desetinná místa vychází požadovaná tloušťka (e) jako 7,2511 mm. Pro dovolené namáhání není normou stanovena přesnost. V softwarech se zaokrouhluje na 2 desetinná místa, což bylo provedeno i ve vlastním výpočtu.

²⁷ Odlišnost vznikla uvažováním gravitačního zrychlení (g) jako $9,8 \text{ ms}^{-2}$ přičemž ve vlastním výpočtu bylo uvažováno g jako $9,81 \text{ ms}^{-2}$.

²⁸ Tato tloušťka není uvedena samostatně, ale jako součást výpočtu. Odchylka vznikla zejména kvůli špatnému dosazení za dovolené namáhání (f_d). Dále je výpočtový tlak (P) zaokrouhlen pouze na 2 desetinná místa.

²⁹ Pro požadovanou tloušťku s přičtením přídavku na korozi a absolutní hodnoty záporné výrobní tolerance není v normě ČSN EN 13445-3 [1] určeno označení.

³⁰ Při použití vnitřního průměru skořepiny (D_i) pro výpočet vychází hodnota jako 11,54 mm.

³¹ Software Sant'Ambrogio umožňuje pro plášť zavést vnitřní průměr jako řídicí, což poté vychází jako 11,54 mm, odlišnost ve výpočtu není způsobena softwarem, ale vzorcem v normě ČSN EN 13445-3 [1].

³² Software VVD vždy používá vnější průměr skořepiny (D_e) jako řídicí.

³³ Chyba vznikla špatným určením středního průměru skořepiny (D_m).

³⁴ Objevují se 2 chyby. Software dosadil jinak, než píše v rozepsaném vzorci. Po zadání čísel do kalkulačky vychází hodnota jako 4,3973, přičemž software píše $(2 \cdot 223,8 \cdot 11,7 \cdot 0,85) / (1024 - 11,7) = 4,354 \text{ N/mm}^2$. Další zásadní chybou je to, že software dosadil špatně za součinitel hodnoty spoje (z). Pro zkušební stav je tento součinitel vždy roven 1.

³⁵ Chyba je způsobena špatným dosazením za dovolené namáhání do vzorce (10.2.3.3.1-1) dle normy ČSN EN 13445-5 [16].

³⁶ PV Elite špatně dosazuje za konstrukční tlak jako 0,69 MPa, přitom se v reportu PV Elite objevuje hodnota pro konstrukční tlak 1,50 MPa.

³⁷ Hodnota je špatně, protože je dosazena chybná hodnota dovoleného namáhání pro normální zatížení (f_d).

6.1.5 Závěr pro plášť

Softwaru Sant'Ambrogio a VVD správně vyhodnotily, že **tloušťka** pláště bude postačující. Odchytky ve výpočtu jsou zanedbatelné. Nicméně pro lepší přehlednost by mělo značení softwarů korespondovat s normou, podle níž je prováděn výpočet. Software PV Elite špatně vyhodnotil, že tloušťka stačit nebude. Stalo se tak zejména z důvodu špatného dosazení za dovolené namáhání při normálním zatížení (f_d), což je materiálová charakteristika.

Vypočítané **tlaky** se liší. Chybu ve všech výpočtech Sant'Ambrogio se nepodařilo najít, protože neuvádí postup výpočtu pro všechny hodnoty. Postup v Sant'Ambrogio je rozepsaný pouze pro výpočet zkušební tlaku, kde se ukázalo, že špatně dosazuje dovolené namáhání. V softwaru VVD byla objevena chyba, že nemodifikuje střední průměr skořepiny (D_m) podle případu zatížení. V softwaru PV Elite se nese chyba kvůli špatnému dosazení za dovolené namáhání při normálním zatížení (f_d). Tato chyba dokonce způsobila, že software špatně vyhodnotil plášť jako poddimenzovaný. Dále je v softwaru PV Elite chyba při dosazení součinitele hodnoty spoje (z) pro zkušební případ zatížení. Software PV Elite špatně dosazuje tlak pro určení zkušební tlaku.

6.2 Torosférické dno

Vypočítané hodnoty ze softwarů Sant'Ambrogio, VVD a PV Elite se přesně neshodovaly, proto byl proveden vlastní výpočet podle normy ČSN EN 13445-3 [1]. Nejdříve je uveden postup vlastního výpočtu. Poté jsou rozebrány údaje ze softwarů pro tloušťky torosférického dna, dále maximální přípustné tlaky pro torosférické dno a na závěr jsou srovnány nejdůležitější veličiny.

6.2.1 Vlastní výpočet

Veškeré výpočty torosférického dna jsou uvedeny jako příloha, v tomto textu je postup vysvětlen.

Nejdříve byly ověřeny geometrické podmínky pro torosférické dno dle kapitoly 7.5.3.1 normy ČSN EN 13445-3 [1]. Některé podmínky obsahují požadovanou tloušťku (e), takže byly ověřeny až po jejím výpočtu. Tyto podmínky byly také splněny. Materiálové charakteristiky se shodují s pláštěm, protože byl pro obojí použit materiál P235GH.

Poté byly řešeny 3 tloušťky (e_s , e_y , e_b), z nichž největší hodnota byla vybrána jako požadovaná tloušťka (e). Požadovaná tloušťka stěny dna pro omezení membránového napětí ve střední části dna (e_s) byla určena na základě vzorce (7.5-1) normy ČSN EN 13445-3 [1]. Požadovaná tloušťka stěny anuloidového přechodu pro zabránění axiálně symetrické deformaci (e_y) byla určena iteračním výpočtem. Nejdříve byl z obrázku 7.5-1 určen součinitel β pro dosazení do vzorce (7.5-2), výsledkem bylo získání tloušťky e_y , která se dosadila do výpočtů nového součinitele β dle kapitoly 7.5.3.5 normy ČSN EN 13445-3 [1]. Tím vznikla nová hodnota β pro dosazení do vzorce (7.5-2). Tímto způsobem probíhaly iterace. Přesnost výpočtu není v normě stanovena, tak byla pro vlastní výpočet zvolena přesnost 0,001 mm. Pro požadovanou tloušťku stěny anuloidového přechodu pro zabránění plastickému boulení (e_b) byla splněna podmínka, která umožňuje, že se tato tloušťka nemusí počítat.

Požadovaná tloušťka torosférického dna byla určena jako $e = 10,72 \text{ mm}$. Dalším krokem byla kontrola tloušťky válcového lemu dna, protože podle podmínky v kapitole 7.5.3.4 normy ČSN EN 13445-3 [1] se musí ještě ověřit požadavky pro válcové skořepiny.

Dále byla počítána únosnost, tzn. maximální přípustný tlak pro dané stavy zatížení. Jedná se o případy: zkorodovaný stav při konstrukční teplotě, nezkorodovaný stav při okolní teplotě a zkušební stav. Po aplikaci vzorců na příslušné případy zatížení byl určen maximální přípustný tlak pro torosférické dno $P_{max} = 1,8648 \text{ MPa}$. Výpočet zkušební tlaku (P_t) byl totožný jako pro plášť, protože obě komponenty mají stejné parametry dosazované vzorců (5) a (6), takže byla opět získána hodnota pro zkušební tlak $P_t = 2,2585 \text{ MPa}$. Tato hodnota musí být menší než maximální zkušební tlak (P_{tmax}), což vyšlo jako $P_{tmax} = 5,1129 \text{ MPa}$. Podmínka $P_t < P_{tmax}$ pro provádění hydraulické tlakové zkoušky je tedy splněna.

6.2.2 Tloušťka torosférického dna podle softwarů

V tabulce 11 jsou uvedeny tloušťky torosférického dna vypočítané v softwarech Sant'Ambrogio, VVD a PV Elite, bližší podrobnosti lze najít v reportech, které jsou přílohami této práce.

Tabulka 11 Vypočítané tloušťky torosférického dna.

Použitý software	Anglický termín	Český termín	Označení rozměru	Hodnota rozměru [mm]
SA	Required thickness of end to limit membrane stress in central part	Požadovaná tloušťka stěny dna pro omezení membránového napětí ve střední části dna	e_s	10,06
	Required thickness of knuckle to avoid axisymmetric yielding	Požadovaná tloušťka stěny anuloidového přechodu pro zabránění axiálně symetrické deformaci	e_y	10,72
	Minimum required thickness	Minimální požadovaná tloušťka	e	10,72
	Straight flange minimum required thickness	Minimální požadovaná tloušťka válcového lemu dna	$e(sf)$	10,45
VVD	Required thickness of end to limit membrane stress in central part	Požadovaná tloušťka stěny dna pro omezení membránového napětí ve střední části dna	e_s	5,7545
	Required thickness of knuckle to avoid plastic buckling	Požadovaná tloušťka stěny anuloidového přechodu pro zabránění plastickému boulení ³⁸	e_b	5,0816
	Required thickness of knuckle to avoid axisymmetric yielding	Požadovaná tloušťka stěny anuloidového přechodu pro zabránění axiálně symetrické deformaci	e_y	6,4420
	Required minimum shell thickness excl. allow.	Minimální požadovaná tloušťka skořepiny bez přídavku	e_{min}	6,4420
	Required minimum shell thickness incl. allow.	Minimální požadovaná tloušťka skořepiny včetně přídavku	e_{mina}	10,74
	Minimum thickness of straight flange incl. corr.	Minimální požadovaná tloušťka válcového lemu dna včetně přídavku	e_{cyla}	11,24
PVE	Required crown thickness due to internal pressure	Požadovaná tloušťka stěny dna ve střední části dna v důsledku vnitřního tlaku	e_s	6,1745
	Computed thickness	Počítaná tloušťka	e_y	6,8273
	Computed thickness	Počítaná tloušťka	e_b	5,3411
	Computed head thickness	Počítaná tloušťka dna	–	10,8273
	Required thickness of straight flange	Požadovaná tloušťka válcového lemu	–	11,774 ³⁹

³⁸ Software Sant'Ambrogio nepočítá požadovanou tloušťku stěny anuloidového přechodu pro zabránění plastickému boulení (e_b). Software VVD ji počítá a správně upozorňuje, že na základě splnění podmínky v normě ČSN EN 13445-3 [1] tuto tloušťku není nutné počítat.

³⁹ Není uveden postup výpočtu.

Ukazuje se, že označení rozměrů opět neodpovídá normě ČSN EN 13445-3 [1]. Software Sant'Ambrogio ke vzorci pro požadovanou tloušťku přičítá i přídavek na korozi (c) a absolutní hodnotu záporné tolerance (δ_e), přičemž výsledek označuje jako požadovanou tloušťku. Přehlednější značení je v softwaru VVD, který ovšem také zavádí vlastní označení. Značení VVD nekoresponduje se značením podle normy ČSN EN 13445-3 [1], protože e_{\min} podle normy znamená minimální přijatelnou výrobní tloušťku, zatímco ve VVD se jedná o požadovanou tloušťku stěny, která se ve zmíněné normě značí e . Naštěstí je to pochopitelné díky slovnímu popisu. Software PV Elite nepožaduje zadání záporné výrobní tolerance (δ_e), což u vnitřního průměru válcového lemu dna (D_i) nevadí, protože je hodnota určena správně na základě konečné tloušťky. Ale chybějící údaj o záporné výrobní toleranci (δ_e) způsobuje chybné určení obou poloměrů torosférického dna. Uživatel tuto chybu může eliminovat tím, že změní zadávané poloměry, tj. zvětší jejich hodnotu o zápornou výrobní toleranci (δ_e).

6.2.3 Tlaky pro torosférické dno podle softwarů

V tabulce 12 jsou uvedeny tlaky torosférického dna vypočítané v softwarech Sant'Ambrogio, VVD a PV Elite, bližší podrobnosti lze najít v reportech, které jsou přílohami této práce.

Tabulka 12 Vypočítané tlaky torosférického dna.

Použitý software	Anglický termín	Český termín	Označení tlaku	Hodnota tlaku [MPa]
SA	Maximum allowable test pressure	Maximální dovolený zkušební tlak	–	5,35
	Maximum allowable design pressure	Maximální dovolený konstrukční tlak	–	1,85
	Hydrostatic test pressure	Tlak hydraulické zkoušky	Pt	2,15
VVD	Maximum allowable working pressure: new and cold	Maximální dovolený pracovní tlak (nezkorodovaný stav při okolní teplotě)	MAWPNC Pmax	2,9259
	Maximum allowable working pressure (corroded condition at design temp.)	Maximální dovolený pracovní tlak (zkorodovaný stav při konstrukční teplotě)	MAWPHC Pmax	1,6049 ⁴⁰
	Max test pressure (uncorroded cond. at ambient temp.)	Maximální zkušební tlak (nezkorodovaný stav při okolní teplotě)	Pmax	5,1360
	Required min. hydrostatic test pressure	Požadovaný min. tlak hydraulické zkoušky	Ptmin	2,2585
PVE	Computed maximum working pressure	Vypočítaný maximální pracovní tlak	MAWP	1,725
	Computed maximum pressure new and cold	Vypočítaný maximální tlak nový a studený	MAPNC	3,59
	Hydrostatic test pressure results	Výsledky pro tlak hydraulické zkoušky	–	1,122

6.2.4 Shrnutí výpočtu torosférického dna

Tabulka 13 uvádí porovnání nejdůležitějších hodnot pro tloušťky torosférického dna.

⁴⁰ Tato hodnota vznikla výběrem nejnižšího tlaku z Ps, Py, Pb a Pcyl. Hodnotu Pcyl software zavádí navíc, podle normy ČSN EN 13445-3 [1] není nutné tento tlak zahrnovat do výběru pro maximální přípustný tlak torosférického dna.

Tabulka 13 Shrnutí výsledků tloušťek pro torosférické dno.

Veličina	Značka	Jednotka	ČSN EN 13445	SA	VVD	PVE
Vnitřní poloměr kulové střední části torosférického dna	R	mm	804,3	804,3	804 ⁴¹	804
Vnitřní průměr válcového lemu dna	D _i	mm	1008,6	1008,6	1008 ⁴² 1011,12	1009 ⁴³ 1008,6
Vnější průměr válcového lemu dna	D _e	mm	1024	1024	1024	–
Požadovaná tloušťka dna pro omezení membránového napětí ve střední části	e _s	mm	5,7566	– ⁴⁴	5,7545 ⁴⁵	6,1745 ⁴⁶
Požadovaná tloušťka anuloidu pro zabránění axiálně symetrické deformaci	e _y	mm	6,4205	– ⁴⁷	6,4420 ⁴⁸	6,8273 ⁴⁹
Minimální požadovaná tloušťka válcového lemu dna včetně přídavků	– ⁵⁰	mm	11,55	10,45 ⁵¹	11,24 ⁵²	11,774 ⁵³
Požadovaná tloušťka včetně přídavků	–	mm	10,72	10,72	10,74	10,8273

⁴¹ Software VVD opomíjí zápornou výrobní toleranci (δ_e).

⁴² VVD do některých vzorců za D_i dosazuje 1008 mm, jindy 1011,12 mm. V prvním případě tedy opomíjí zápornou výrobní toleranci (δ_e). Vznik druhé hodnoty se také podařilo rozklíčovat. Úvahou $(D_e - 1011,12) / 2 = (1024 - 1011,12) / 2 = 6,44$ mm bylo zjištěno, kolik software odebral od vnějšího průměru z každé strany. Hodnota 6,44 mm je spočítaná požadovaná tloušťka (emin ve VVD). Software tedy použil vzorec $D_e - 2e_{min} = 1024 - 2 \cdot 6,44 = 1011,12$ mm. Tento postup softwaru je špatně. Pokud chceme vyjít z D_e, tak musíme použít vzorec $D_e - 2(e_n - c - \delta_e) = 1024 - 2(12 - 4 - 0,3) = 1008,6$ mm.

⁴³ Hodnota se někdy objevuje špatně dosazená při výpočtu tloušťky eb.

⁴⁴ Sant'Ambrogio tuto hodnotu uvádí až s přičtením přídavků jako 10,06 mm. Pro doplnění údaje do tabulky musíme odečíst přídavky, tzn. $10,06 - c - \delta_e = 10,06 - 4 - 0,3 = 5,76$ mm.

⁴⁵ Odchylka vznikla dosazením špatné hodnoty vnitřního poloměru kulové střední části torosférického dna (R).

⁴⁶ Tato hodnota nese chybu špatně dosazeného dovoleného namáhání (f_d), poloměr střední části dna (R) bez záporné výrobní tolerance (δ_e) a tlak zaokrouhlený pouze na 1 desetinné místo.

⁴⁷ Sant'Ambrogio tuto hodnotu opět uvádí až s přičtením přídavků jako 10,72 mm. Pro doplnění údaje do tabulky musíme odečíst přídavky, tzn. $10,72 - c - \delta_e = 10,72 - 4 - 0,3 = 6,42$ mm.

⁴⁸ Odchylka je způsobena špatným dosazením D_i a R.

⁴⁹ Chybu způsobuje špatně dosazené namáhání (f_d), poloměr střední části dna (R) bez záporné výrobní tolerance (δ_e), vnitřní průměr (D_i) jako 1009 mm a tlak zaokrouhlený pouze na 1 desetinné místo.

⁵⁰ Výpočet se provádí podle vzorce (7.4-1) nebo (7.4-2) normy ČSN EN 13445-3 [1], tzn. jedná se o požadovanou tloušťku válcové skořepiny (e). Pro přehlednost by měl být zaveden index, ale to norma neurčuje.

⁵¹ Vypočítaná hodnota podle SA se dokonce neshoduje s výpočtem pláště v SA. Postup není rozepsán, takže se nepodařilo najít chybu.

⁵² Vypočítaná hodnota podle VVD se dokonce neshoduje s výpočtem pláště ve VVD. Zde je špatně dosazeno za D_i a neuvažuje se záporná výrobní tolerance (δ_e).

⁵³ Není uveden postup výpočtu.

Tabulka 14 uvádí porovnání nejdůležitějších hodnot tlaků torosférického dna.

Tabulka 14 Shrnutí výsledků tlaků pro torosférické dno.

Maximální přípustný tlak pro:	Značka	Jednotka	ČSN EN 13445	SA	VVD	PVE
Zkorodovaný stav při konstrukční teplotě	P_{\max}^{54}	MPa	1,8648	1,85	1,6049 ⁵⁵	1,725 ⁵⁶
Nezkorodovaný stav při okolní teplotě	P_{\max}	MPa	3,5932	–	2,9259 ⁵⁷	3,59
Zkušební stav	P_{\max}	MPa	5,3613	5,35	5,1360 ⁵⁸	–
Zkušební tlak	P_t	MPa	2,2585	2,15 ⁵⁹	2,2585	1,122 ⁶⁰

6.2.5 Závěr pro torosférické dno

Výsledky vlastního výpočtu **tloušťek** se shodují s výsledky softwaru Sant'Ambrogio. V softwaru VVD se objevují chyby v hodnotách pro vnitřní poloměr kulové střední části torosférického dna (R) a vnitřní průměr válcového lemu dna (D_i). Vzhledem k tomu, že se tyto hodnoty dosazují do mnoha vzorců, tak vznikly odchylky při určení požadované tloušťky. Odchylky nejsou v tomto případě rozhodující, protože jsou v řádu setiny milimetru, zatímco do jmenovité tloušťky zbývá více než milimetr. PV Elite se dopouští několika chyb, jedná se o špatně dosazeného dovolené namáhání (f_d), poloměr střední části dna (R) bez záporné výrobní tolerance (δ_e) a tlak zaokrouhlený pouze na 1 desetinné místo.

Software Sant'Ambrogio opět neuvádí postup výpočtu pro zjištění **tlaků**, takže výpočtář nemůže tento postup efektivně zkontrolovat. VVD zanedbává zápornou výrobní toleranci při určování R a D_i , což způsobuje chybu i při výpočtu tlaků. Dále VVD zavádí tlak „Pcyl“, který navíc oproti normě ČSN EN 13445-3 [1] zahrnuje do výběru pro maximální přípustný tlak; pokud je z vybíraných tlaků vybrán právě „Pcyl“, tak to samozřejmě způsobí odlišnost. PV Elite nerozepisuje vzorce pro zjištění maximálního přípustného tlaku torosférického dna.

⁵⁴ Norma neurčuje indexy pro odlišení maximálních přípustných tlaků.

⁵⁵ Odlišnost vznikla, protože VVD zavádí oproti normě ČSN EN 13445-3 [1] navíc hodnotu tlaku Pcyl, kterou zahrnuje do výběru pro maximální přípustný tlak. Software VVD píše pro výpočet Pcyl vzorec $P_{cyl} = 2 * e_a * f * z / (D_i + e_a) = 2 * 7,7 * 124,53 * 0,85 / (1008 + 7,7) = 1,6049$ MPa, což připomíná vzorec pro maximální přípustný tlak pláště (7.4-3) dle normy ČSN EN 13445-3 [1]. Čitatelé obou vzorců se shodují. Ovšem ve jmenovateli je ve vzorci (7.4-3) střední průměr skořepiny (D_m), což ve vzorci pro „Pcyl“ neodpovídá. Střední průměr skořepiny (D_m) lze obecně určit jako $D_m = D_e - e_a = (D_i + D_e) / 2$. Původ vzorce tedy nebyl přesně zjištěn, v reportu VVD není uveden odkaz na určitý vzorec z normy ČSN EN 13445-3 [1]. Nicméně do vzorce pro „Pcyl“ dle VVD je špatně dosazeno pro vnitřní průměr (D_i), protože je zanedbána záporná výrobní tolerance (δ_e).

⁵⁶ Chybí postup výpočtu.

⁵⁷ Opět byla vybrána hodnota Pcyl pro maximální přípustný tlak. Pro tuto hodnotu je špatně dosazeno za vnitřní průměr (D_i), protože nebyl uvažován nezkorodovaný stav. Dále je zanedbána záporná výrobní tolerance (δ_e).

⁵⁸ Opět byla vybrána hodnota Pcyl pro maximální přípustný tlak. Opět nebyl vnitřní průměr (D_i) modifikován pro nezkorodovaný stav. Dále je zanedbána záporná výrobní tolerance (δ_e).

⁵⁹ Chyba je způsobena špatným dosazením za dovolené namáhání do vzorce (10.2.3.3.1-1) dle normy ČSN EN 13445-5 [16].

⁶⁰ Je špatně dosazeno za konstrukční tlak.

ZÁVĚR

Ačkoliv se při návrhu zadaného výměníku tepla zdálo, že se nejlépe pracuje v softwaru Sant'Ambrogio, tak se ukázalo, že tento software má nejméně rozepsaný report, takže ani zkušený výpočtář nemůže letným pohledem zkontrolovat postup. Dále v softwaru Sant'Ambrogio bylo zjištěno nejvíce nesrovnalostí ve značení. Software VVD má nejhorší grafické zpracování, ale na druhou stranu nejpřehlednější výstupní protokol. Software PV Elite má dobré grafické zpracování i přehlednost reportu, ale u řešeného výměníku tepla se objevila největší odchylka od vlastního výpočtu podle normy ČSN EN 13445-3 [1]. Pro představu o míře odlišnosti výpočtů je uvedena tabulka 15.

Tabulka 15 Některé výsledky výpočtů pláště a torosférického dna.

Veličina	Jednotka	ČSN EN 13445	SA	VVD	PVE
PLÁŠŤ					
Požadovaná tloušťka včetně přídavků	mm	11,55	11,55	11,55	11,83
Maximální přípustný tlak	MPa	1,6040	1,59	1,6040	1,476
TOROSFÉRICKÉ DNO					
Požadovaná tloušťka včetně přídavků	mm	10,72	10,72	10,74	10,8273
Maximální přípustný tlak	MPa	1,8648	1,85	1,6049	1,725

Odchylky od vlastního výpočtu vznikaly nejčastěji z důvodu špatné modifikace rozměrů vlivem koroze a záporné výrobní tolerance. V softwaru Sant'Ambrogio se často nepodařilo určit přesnou příčinu odchylky, protože není ve výstupním protokolu podrobně rozepsaný postup. V softwaru VVD bylo zjištěno, že špatně stanovuje střední průměr skořepiny (D_m), protože hodnotu nemění pro nezkorodovaný stav, to způsobilo odchylky při výpočtu maximálního přípustného tlaku pláště. Při výpočtu torosférického dna software VVD i PV Elite opomíjí zápornou výrobní toleranci (δ_e) při určování vnitřního poloměru kulové střední části torosférického dna (R). U softwaru PV Elite způsobilo největší chybu špatné zavedení materiálových charakteristik, takže byla dosazována špatná hodnota dovoleného namáhání při normálním zatížení (f_d), což vyústilo až ve špatné vyhodnocení pláště jako poddimenzovaného. Také při výpočtu torosférického dna tím byly způsobeny značné odchylky.

Používání výpočetních softwarů může usnadnit výpočtářům práci, pokud jsou schopni výstupní protokoly správně interpretovat. Ukázalo se, že v softwarech Sant'Ambrogio, Visual Vessel Design a PV Elite se vyskytují chyby, proto je nutné, aby se výpočtář vždy zamyslel nad správností vypočítaných výsledků. Výpočtář by měl při analýze reportu zkontrolovat svoje zadání vstupů, materiálové charakteristiky i postup výpočtu. Nejdůležitější je dodržet bezpečný návrh. Pokud výpočtář usiluje o co největší úsporu materiálu, tak velmi záleží na přesnosti, a měl by raději provést vlastní výpočet.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN 13445-3. *Netopené tlakové nádoby – Část 3: Konstrukce a výpočet*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [2] CHATTOPADHYAY, Somnath. *Pressure Vessels: Design and Practice*. Boca Raton: CRC Press, c2005. Mechanical engineering. ISBN 0-8493-1369-4.
- [3] STEHLÍK, Petr, Josef KOHOUTEK a Jan NĚMČANSKÝ. *Tepelné pochody: Výpočet výměníku tepla*. Brno: VUT Brno, 1991. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0363-2.
- [4] Dimenzování tlakových zařízení podle mezních stavů. *TLAKinfo: oborový portál pro vyhrazená tlaková zařízení – kotle, tlakové nádoby, potrubí* [online]. DEKRA Industrial, 2011 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://www.tlakinfor.cz/t.py?t=2&i=1818&z=2>
- [5] TOWLER, Gavin a Ray SINNOTT. *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. Second Edition. Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-0-08-096659-5.
- [6] Seznam nařízení vlády k provedení zákona č. 90/2016 Sb. *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. ÚNMZ, 2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/test/seznam-narizeni-vlady-k-provedeni-zakona-c-90-2016-sb->
- [7] Pravidla pro aplikaci směrnice 2014/68/EU (PED) – tlaková zařízení (aktualizace 7/17). *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. ÚNMZ, c2019, 07/2017 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/pravidla-pro-aplikaci-smernice-2014-68-eu-ped-tlakova-zarizeni-aktualizace-7-17--c936>
- [8] Normy a související legislativa. *TZB-info* [online]. Český normalizační institut, 2001 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/464-normy-a-souvisejici-legislativa>
- [9] ČSN EN 13445-1. *Netopené tlakové nádoby – Část 1: Obecně*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [10] ČSN EN 13445-3. *Netopené tlakové nádoby – Část 3: Konstrukce a výpočet*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [11] ČSN EN 13445-3. *Netopené tlakové nádoby – Část 3: Konstrukce a výpočet*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [12] Standards and Certification Chronology. *The American Society of Mechanical Engineers* [online]. New York: ASME [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.asme.org/about-asme/who-we-are/history/history-of-asme-standards/codes-and-standards-chronology>
- [13] ČSN EN 13445-2. *Netopené tlakové nádoby – Část 2: Materiály*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [14] ČSN EN 10028-7. *Ploché výrobky z ocelí pro tlakové účely – Část 7: Korozivzdorné oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

- [15] ČSN EN 10222-5. *Ocelové výkovky pro tlakové účely – Část 5: Martenzitické, austenitické a austeniticko-feritické korozivzdorné oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [16] ČSN EN 13445-5. *Netopené tlakové nádoby – Část 5: Kontrola a zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [17] Calculated MAP, MAWP and Test Pressures. *Mechanical Eng.* [online]. 2014 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://mechanical-engineering-one.blogspot.com/2014/10/calculated-map-mawp-and-test-pressures.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ASME	Americká asociace strojních inženýrů (American Society of Mechanical Engineers)
BPVC	Boiler and Pressure Vessel Code
ČR	Česká republika
DBA	návrh na základě analýzy (design by analysis)
DBE	návrh na základě experimentu (design by experiment)
DBF	návrh na základě vzorců (design by formula)
MKP	metoda konečných prvků
PED	Směrnice pro tlaková zařízení (Pressure Equipment Directive)
PVE	PV Elite
SA	Sant'Ambrogio
VVD	Visual Vessel Design

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Výměník tepla s U-trubkami [1]	17
Obrázek 2 Schéma návrhového procesu [2]	20
Obrázek 3 Ilustrační obrázek zadaného výměníku tepla	24
Obrázek 4 Zobrazení modelu výměníku tepla v Sant'Ambrogio	26
Obrázek 5 Přední pohled na model v Sant'Ambrogio	26
Obrázek 6 Přední pohled na model ve VVD	27
Obrázek 7 Zobrazení modelu výměníku tepla v PV Elite	27
Obrázek 8 Přední pohled na model v PV Elite	27
Obrázek 9 Reakce na chybějící údaj v softwaru Sant'Ambrogio	28
Obrázek 10 Propojení zadávacích polí a kót na náčrtu v Sant'Ambrogio	29
Obrázek 11 Zadávání komponenty ve VVD	30
Obrázek 12 Nastavení jednotek v softwaru PV Elite	30
Obrázek 13 Zadávání komponenty v PV Elite	31
Obrázek 14 Upozornění Sant'Ambrogio	33
Obrázek 15 Upozornění VVD	33
Obrázek 16 Upozornění PV Elite	34
Obrázek 17 Ukázka výpočtu v Sant'Ambrogio	34
Obrázek 18 Ukázka výpočtu ve VVD	34
Obrázek 19 Ukázka výpočtu v PV Elite	35
Obrázek 20 Zadání pláště do softwaru Sant'Ambrogio	36
Obrázek 21 Vyhodnocení torosférického dna v Sant'Ambrogio	37
Obrázek 22 Jiné označení zadávacího pole a kóty na náčrtu v Sant'Ambrogio	38
Obrázek 23 Definice tloušťek dle ČSN EN 13445-3 [1]	39

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Zadané parametry výměníku tepla.	25
Tabulka 2 Nesrovnalost v Tabulce E.2-1 normy ČSN EN 13445-2 [13].	32
Tabulka 3 Geometrie pláště ve výstupním protokolu softwaru Sant'Ambrogio.	36
Tabulka 4 Vlastnosti materiálu P235GH.	40
Tabulka 5 Veličiny pro výpočet požadované tloušťky pláště.	41
Tabulka 6 Veličiny pro výpočet maximálního přípustného tlaku pláště.	42
Tabulka 7 Veličiny pro výpočet zkušebního tlaku pláště.	42
Tabulka 8 Vypočítané tloušťky pláště.	43
Tabulka 9 Vypočítané tlaky pro plášť.	44
Tabulka 10 Shrnutí výsledků pro plášť.	46
Tabulka 11 Vypočítané tloušťky torosférického dna.	49
Tabulka 12 Vypočítané tlaky torosférického dna.	51
Tabulka 13 Shrnutí výsledků tlouštěk pro torosférické dno.	52
Tabulka 14 Shrnutí výsledků tlaků pro torosférické dno.	53
Tabulka 15 Některé výsledky výpočtů pláště a torosférického dna.	54

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Vlastní výpočet pláště dle normy ČSN EN 13445

Příloha B: Vlastní výpočet torosférického dna dle normy ČSN EN 13445

Příloha C: Výstupní protokol Sant'Ambrogio

Příloha D: Výstupní protokol Visual Vessel Design

Příloha E: Výstupní protokol PV Elite